

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. Martin Vánský

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

**Návrh synchronního generátoru pomocí
numerických metod.**

**Design of Synchronous Generator by Help of the
FEM Simulation.**

2015

Bc. Martin Vánský

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Vánský**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh synchronního generátoru pomocí numerických metod**
Design of Synchronous Generator by Help of the FEM Simulation

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Základní popis a konstrukce synchronního stroje
3. Proveďte elektromagnetický návrh synchronního stroje pomocí numerické simulace
4. Vyhodnoťte provedenou analýzu a výsledky porovnejte s reálnou konstrukcí generátoru
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- GIERAS, F., Jacek. Permanent magnet Motor Technology, New York, Marcel Dekker, Inc., 2002
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

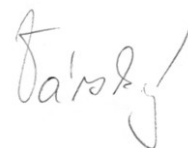



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení studenta:

Čestně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 4.5.2015



.....
Bc. Martin Vánský

Poděkování:

Rád bych vyjádřil své poděkování váženému panu konzultantovi Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval, ale i za trpělivost, kterou se mnou měl, a za jeho cenné rady, které výraznou mírou dopomohly ke zkvalitnění úrovně mé diplomové práce. Poděkování také patří panu Ing. Jiřímu Bůbelovi za čas mi věnovaný, ale i za cenné a vzácné rady. Velké poděkování také patří mé rodině a blízkým, kteří mi po celou dobu vyjadřovali podporu.

Abstrakt:

Cílem diplomové práce je vytvoření modelu synchronního generátoru dle skutečné předlohy a zadání a provedení optimalizačních úprav magnetického obvodu stroje vedoucích k požadovanému nastavení modelu a následné analýze simulací. Hlavním úkolem práce je srovnání výsledků simulací vytvořených v programu ANSYS Maxwell s výsledky měření reálného stroje. V teoretické části je systematicky popsán synchronní stroj, jeho historie, princip, rozdělení a užití především v elektroenergetice.

Klíčová slova:

synchronní stroj, synchronní generátor, synchronní motor, vinutí, rotor, stator, charakteristika naprázdno, charakteristika nakrátko, software ANSYS Maxwell

Abstract:

The thesis aims to create a model of a synchronous generator according to the real synchronous generator and optimization of magnetic circuit of machine leading to the setting of the model and subsequent analysis of the simulations. The main task of the study is to compare simulation results generated in ANSYS Maxwell with the measurements of a real machine. The theoretical part is systematically describes synchronous generator, its history, principles, division and use, especially in the power engineering.

Keywords:

synchronous machine, synchronous generator, synchronous motor, windings, rotor, stator, No-load characteristic, Short circuit characteristic, software ANSYS Maxwell

Seznam použitých symbolů a zkratek

B_{Sz}	indukce v zubu statoru	(T)
B_{Rz}	indukce v zubu rotoru	(T)
B_{δ}	indukce ve vzduchové mezeře	(T)
F_r	reakční magnetické napětí	(A)
F_{δ}	reakční magnetické napětí ve vzduchové mezeře	(A)
I_N	jmenovitý proud	(A)
I_b	budící proud	(A)
I_l	fázový proud	(A)
I_{lk}	ustálený zkratový proud	(A)
M_a	asynchronní moment	(Nm)
M_S	synchronní moment	(Nm)
N_l	počet vinutí	(závit)
P	činný výkon	(W)
Q	jalový výkon	(var)
R_{rot}	odpor vinutí rotoru	(Ω)
R_l	odpor vinutí statoru	(Ω)
S	zdánlivý výkon	(V·A)
U_f	fázové napětí	(V)
U_N	jmenovité napětí	(V)
U_i	efektivní hodnota indukovaného napětí jedné fáze	(V)
U_{ik}	indukované napětí při stavu nakrátko	(V)
U_r	remanentní napětí	(V)
X_l	reaktance kotvy	(Ω)
$\cos\varphi$	účinník	(-)
f	frekvence	(Hz)
i_k	zkratový poměr	(-)
k_{Cu}	činitel plnění drážky statoru	(-)
k_{v1}	činitel vinutí statoru	(-)
n_s	synchronní otáčky	(min ⁻¹)
p	počet pól párů	(-)

s	skluz	(-)
$x_{1\sigma}$	rozptylová reaktance statorového vinutí	(Ω)
x_r	reaktance kotvy	(Ω)
β	zátěžný úhel	($^\circ$)
Φ	magnetický tok	(Wb)
η	účinnost	(%)
ΔP_{Cu}	ztráty v mědi	(W)
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	(W)
ΔP_{Mech}	ztráty v železe	(W)
ΔP_{Celk}	celkové ztráty	(W)

Pokud v tomto seznamu nejsou některé zkratky uvedeny, jsou vysvětleny přímo v textu.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 SYNCHRONNÍ STROJE.....	2
1.1 HISTORIE SYNCHRONNÍHO STROJE.....	2
1.2 ZÁKLADY ELEKTROENERGETIKY	4
1.3 ÚČEL A POUŽITÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	4
1.4 PRINCIP SYNCHRONNÍHO STROJE	4
1.5 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ	7
1.5.1 Synchronní stroj s hladkým rotorem	7
1.5.2 Synchronní stroj s vyniklými póly.....	9
1.5.3 Provedení statorového svazku	11
1.5.4 Kostra statoru.....	12
1.5.5 Provedení rotoru	14
1.5.6 Provedení hřídele.....	14
1.5.7 Provedení střídavých vinutí	14
2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ VE STAVBĚ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	15
2.1 MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY	15
2.2 MATERIÁLY PRO VODIČE	15
2.3 IZOLAČNÍ MATERIÁLY	16
2.4 VODIČE PRO VINUTÍ	16
2.5 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY.....	17
3 SYNCHRONNÍ MOTOR.....	18
3.1 SPOUŠTĚNÍ SYNCHRONNÍHO MOTORU.....	18
3.2 CHARAKTERISTIKY SYNCHRONNÍHO MOTORU	20
3.2.1 Momentová charakteristika synchronního motoru	20
3.2.2 Zatěžovací charakteristiky synchronního motoru.....	21
3.2.3 V-křivky synchronního motoru	21
3.3 SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY	22
4 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR	23
4.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA SYNCHRONNÍHO STROJE.....	23
4.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	24
4.2.1 Charakteristika regulační	24
4.2.2 Indukční charakteristika	24
4.2.3 Charakteristika naprázdno	24
4.2.4 Charakteristika nakrátko	25
5 NÁVRH SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU.....	27
5.1 NÁVRH POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	38
5.1.1 Varianta zapojení do hvězdy - Y 6600 V	39
5.1.2 Varianta zapojení do trojúhelníku - D 690 V	50
5.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ DOSAŽENÝCH VÝPOČTY V PROGRAMU ANSYS MAXWELL SE ZADANÝMI A NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI.....	59
5.2.1 Srovnání varianty zapojení Y 6600 V	59
5.2.2 Srovnání varianty zapojení D 690 V	63

ZÁVĚR.....	67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	69
SEZNAM TABULEK	71
SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Synchronní generátory patří mezi nejpoužívanější stroje na výrobu střídavého elektrického proudu a díky této roli v elektroenergetice se tak staly neodmyslitelnou součástí našeho každodenního života. Svoji práci odvádějí ve většině vodních i tepelných elektrárnách. Synchronní generátory jsou využívány i v elektrárnách větrných. Pokud je zde použit synchronní generátor s permanentními magnety, odpadá nutnost údržby, oproti použití asynchronního generátoru. Od prvního zkonstruovaného stroje se mnohé změnilo a synchronní generátory si prošly rozsáhlým vývojem.

Pro výrobu elektrické energie jsou používány od malých strojů až po stroje velké o vysokém výkonu. Ve vodních elektrárnách jsou používány nejčastěji synchronní generátory s vyniklými póly, které mají nižší otáčky. Tyto stroje nazýváme hydroalternátory. Ve spojení s parní turbínou se hojně užívá synchronních generátorů s hladkým rotorem. Tyto stroje pracují s vysokými otáčkami a nazýváme je turboalternátory.

V dnešní době jsou synchronní generátory na rozdíl od svých předchůdců konstrukčně i technicky propracovanější a výrobně jednodušší. Pro výpočet se využívá nejmodernější techniky za pomoci nejlepších výpočetních programů, které pracují s nejmodernějšími výpočetními postupy. Za použití nejkvalitnějších materiálů se tyto stroje stávají špičkou ve své oblasti.

V teoretické části práce je uveden všeobecný popis synchronního stroje od historie až po princip funkce. Jedna z kapitol je také věnována materiálům používaných ve strojích. Jedná se o materiály používané na magnetické obvody, materiály na vodiče, materiály izolační a také materiály konstrukční. Další kapitola patří synchronním motorům. V této kapitole je stručně popsána charakteristika synchronního motoru, jeho spouštění a základní charakteristiky. Poslední část teoretické práce je zaměřena na synchronní generátory. Jsou zde uvedeny základní charakteristiky synchronního generátoru.

Praktická část práce je zaměřena na návrh numerického modelu v programu ANSYS Maxwell podle požadovaných parametrů. Jelikož se jedná o speciální synchronní generátor umožňující různé varianty zapojení s různými napěťovými hladinami, je zde demonstrován model pro dvě varianty zapojení. Výsledné parametry modelu jsou srovnány se skutečnými parametry již vyrobeného stroje.

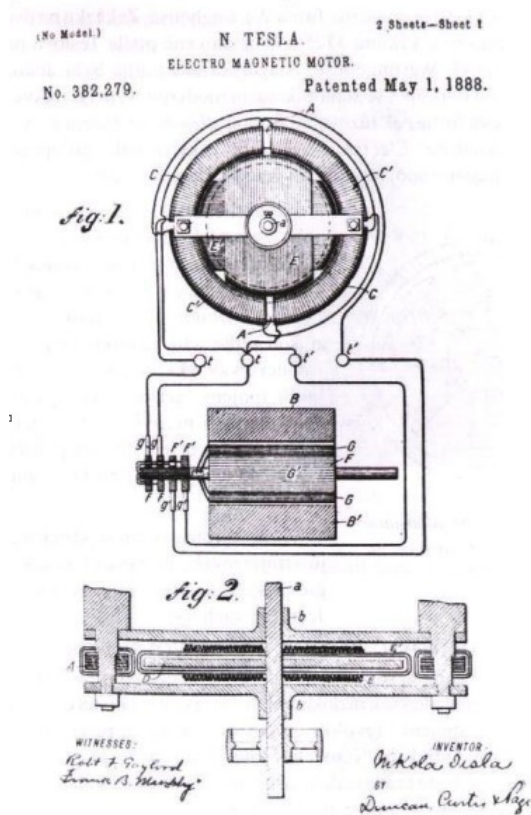
1 SYNCHRONNÍ STROJE

1.1 Historie synchronního stroje

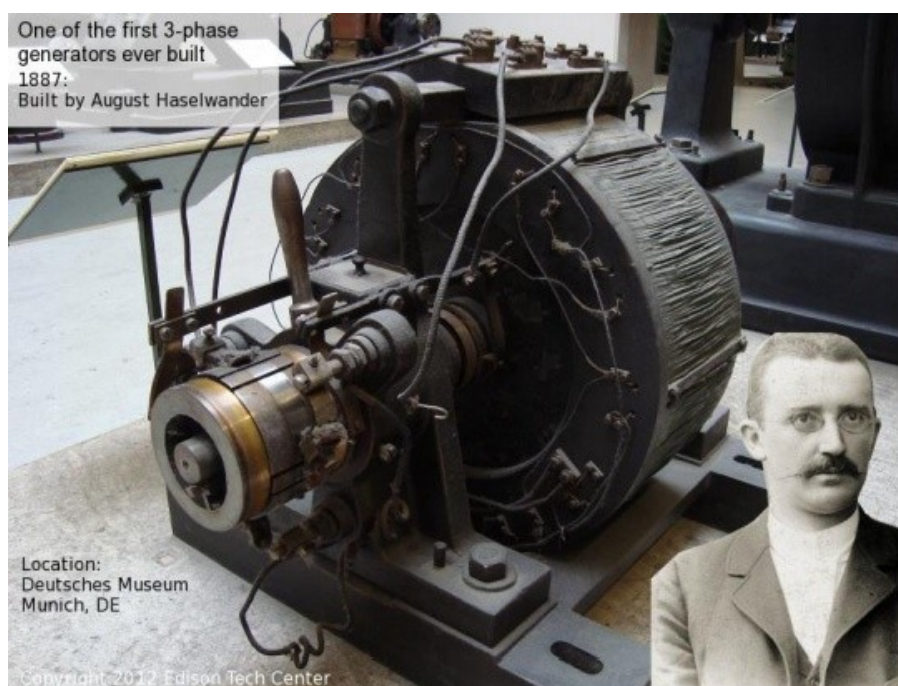
Do devadesátých let 19. století se používaly výhradně stejnosměrné stroje a stejnosměrný rozvod elektrické energie. Nikola Tesla přišel s myšlenkou točivého magnetického pole, když v roce 1888 učinil objev točivého magnetického pole pomocí dvou cívek napájených střídavým proudem s fázovým posunem o 90 stupňů postavených kolmo k sobě. Tento objev umožnil zkonstruování střídavého indukčního motoru, který je dnes nazýván asynchronním motorem. Nikola Tesla je považován za nejvýznamnějšího elektrotechnika všech dob. Jeho velký počet patentů změnilo další vývoj elektrotechniky. [1, 6, 13]

Počátky synchronních strojů jsou v začátku devadesátých let 19. století. Friedrich August Haselwander, německý inženýr, v roce 1887 vynalezl první trojfázový synchronní generátor. Stroj vyráběl elektrickou energii o výkonu 2,8 kW při 960 ot/min o výstupní frekvenci 32 Hz. Tento stroj je vystaven v Německém muzeu v Mnichově. [1, 6, 13]

Významný byl také pro synchronní generátory trojfázový vysokonapěťový elektrický přenos proudu z Lauffenu am Neckar na mezinárodní výstavu do Frankfurtu. Tento přenos mohl být realizován díky generovanému napětí trojfázovým hydrogenerátorem o výkonu 210 kW, který byl vyroben v Maschinenfabrik Oerlikon v Zurichu. Přenos se uskutečnil v roce 1891. [1, 6, 13]



Obr. 1 Část patentního spisu Nikola Tesly



Obr. 2 První komerčně vyráběný 3 fázový generátor[11]

1.2 Základy elektroenergetiky

Elektrická energie je jednou z nejrozšířenějších druhů energie sloužící v současné době člověku. Její přenos na velké vzdálenosti je snadný a lze ji rozvádět téměř do všech míst, ve kterých je jí zapotřebí. Přeměna na jiný druh energie je jednoduchý (např. mechanickou, tepelnou, světelnou a další). [1]

Jedním ze základních zařízení každé elektrárny je elektrický generátor, stroj vyrábějící elektrický proud. Například v jaderné elektrárně Temelín pracují dva 1 GW turboalternátory. První elektrárny v předminulém století vyráběly stejnosměrný proud v generátorech stejnosměrného proudu tzv. dynamech. Stejnosměrný proud však bylo v minulosti obtížné přenášet na delší vzdálenosti, proto se později přešlo výhradně na střídavý proud. Střídavý proud je vyráběn ve střídavých generátorech proudu, nejčastěji v tzv. synchronních generátorech. K přenosu stejnosměrného proudu o velmi vysokém napětí na delší vzdálenosti se začalo až v pozdější době. Zdrojem je ale opět synchronní generátor a jeho střídavý proud se po transformaci na potřebné napětí usměrní. [1]

1.3 Účel a použití synchronních strojů

Synchronní stroje se nejčastěji používají jako měniče k přeměně mechanické energie na energii elektrickou a to energii střídavého proudu. Dále se také používají synchronní stroje za účelem dodávání jalového výkonu do elektrické sítě. Tyto stroje nazýváme synchronní kompenzátory. Synchronní stroje se také používají jako měnič elektrické energie na mechanickou, tzv. synchronní motory. [2]

Synchronní stroje jsou vyráběny ve velkém rozsahu výkonů a to od wattů až po tisíce megawattů (alternátory). S rozvojem výkonové elektroniky našly synchronní motory uplatnění i v oblasti pohonů s regulací rychlosti a to u pohonů velkých výkonů, tak i pohonů malých výkonů v oblasti automatizace a robotiky. V sedmdesátých letech 20. století byly pro tepelné elektrárny vyrobeny dvoupólové alternátory o výkonu více jak 1000 MW nazývané turboalternátory, pro jaderné elektrárny čtyřpólové turboalternátory o výkonu 1500 MW. Pro vodní elektrárny byly určeny hydroalternátory s výkony přesahující 500 MW. Turboalternátory a hydroalternátory vyrábějí téměř veškerou elektrickou energii. Turboalternátory pohání parní nebo plynové turbíny. Dvoupólové stroje mají jmenovité otáčky 3000 min^{-1} při kmitočtu 50 Hz a čtyřpólové mají otáčky 1500 min^{-1} . Hydroalternátory roztáčí vodní turbíny, které mají jmenovité otáčky od 100 min^{-1} do 500 min^{-1} . počet otáček u hydroalternátorů je určen typem vodní turbíny. Synchronní kompenzátory mají šest a osm pólů a jejich jmenovité otáčky jsou tedy 1000 min^{-1} a 750 min^{-1} . [2]

1.4 Princip synchronního stroje

Stejně jako všechny točivé stroje pracuje synchronní stroj na principu točivého magnetického pole, které vytváří zpravidla třífázové vinutí. Název synchronní stroj plyne z toho,

že rotor se otáčí shodnou rychlostí jako magnetické pole statoru. Ve statoru se nachází zpravidla střídavé vinutí, v rotoru je uloženo vinutí budící napájené stejnosměrným proudem. Budící vinutí má výkon několik procent oproti vlastnímu výkonu synchronního stroje. V některých případech může být uloženo v rotoru také tlumící vinutí a nebo rozběhové vinutí. Rotor synchronního generátoru bývá připojen k vnějšímu pohonu. Jestliže budícím vinutím prochází proud a rotor se otáčí, vzniká točivé magnetické pole. Magnetické pole indukuje ve statorovém vinutí střídavé trojfázové napětí, které je dáno vztahem: [8]

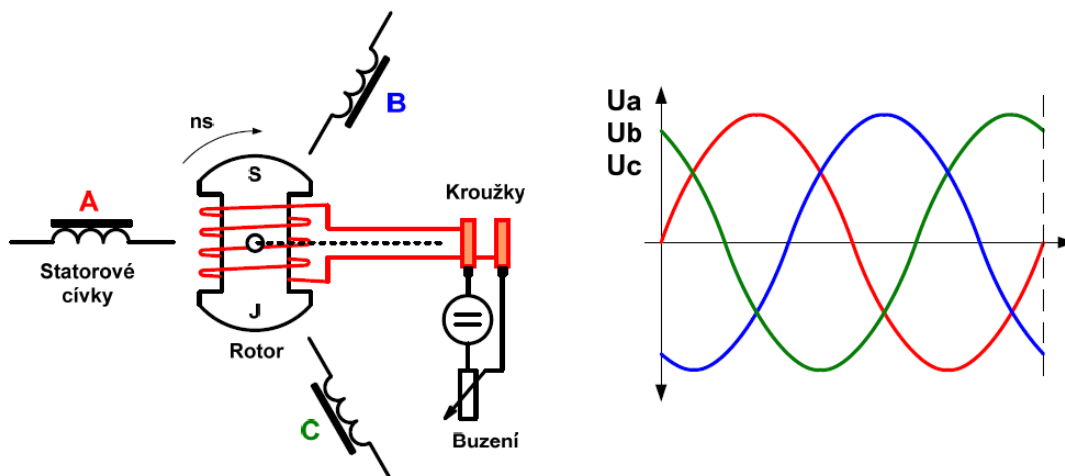
$$U_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_1 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} = 4,44 \cdot \Phi_1 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_v \quad (1.1)$$

kde	U_i	efektivní hodnota indukovaného napětí jedné fáze (V)
	Φ_1	magnetický tok (Wb)
	f_1	kmitočet fáze (Hz)
	N_1	počet vinutí jedné fáze
	k_{v1}	činitel vinutí statoru (-)

Po připojení zátěže na statorové vinutí začne tímto vinutím protékat střídavý proud, který vyvolá magnetické pole v magnetickém obvodu statoru. Obě tyto pole se otáčejí shodnou rychlostí, neboli synchronní. Synchronní otáčky jsou dány vztahem: [8]

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.2)$$

kde	n_s	synchronní otáčky (min^{-1})
	f	frekvence (Hz)
	p	počet pól párů (-)



Obr. 3 Základní princip synchronního stroje [8]

Synchronní stroj pracuje stále se synchronními otáčkami, proto se se zatížením otáčky nemění. Mění se však zátěžný úhel β vyjadřující vzájemné posunutí magnetických polí. Pokud magnetická pole statoru a rotoru nejsou vůči sobě posunuta, pak je hodnota $\beta=0$. Jestliže ale magnetické pole rotoru zaostává za magnetickým polem statoru, pak je hodnota $\beta>0$. Při generátorickém režimu magnetické pole rotoru předbíhá magnetické pole statoru a hodnota $\beta<0$. Při překročení maximální hodnoty zátěžného úhlu stroj vypadne ze synchronismu. [13]

Rotor synchronního stroje se navrhuje buď s hladkým rotorem nebo vyniklými póly. Dvoupólové a velké čtyřpólové stroje se vyrábějí s hladkým rotorem. Budící vinutí je rozloženými cívkami, které jsou vloženy do drážek po celém obvodu rotoru. Menší čtyřpólové, šestipólové a vícepólové stroje mají rotor s vyniklými póly. Budící vinutí je opět tvořeno cívkami, které jsou uloženy na jádrech pólů. Póly jsou od sebe pravidelně vzdáleny o pólovou rozteč. [4]

Mezi statorem a rotorem se nachází vzduchová mezera a velikost jejího radiálního rozměru je závislá především na výkonu stroje. Velikost mezery se pohybuje v řádu milimetrů až několika centimetrů. [4]

Jak už bylo zmíněno výše, ve statoru je uloženo střídavé vinutí, které bývá nejčastěji třífázové, někdy mnohofázové a ve zvláštních případech jednofázové. Trojfázové vinutí se spojuje do hvězdy. Vinutí statoru se ukládá do drážek a bývá jednovrstvé nebo dvouvrstvé se zkráceným krokem. Vinutí budící bývá umístěno v drážkách rotoru nebo na jádrech pólů. Tlumící vinutí, neboli klecové vinutí, se vyskytuje u alternátorů s vyniklými póly a umísťuje se v pólových nástavcích. Tlumící vinutí slouží k možnosti asynchronního rozběhu, proto se také nazývá rozběhové vinutí. [2, 4]

1.5 Konstrukce synchronních strojů

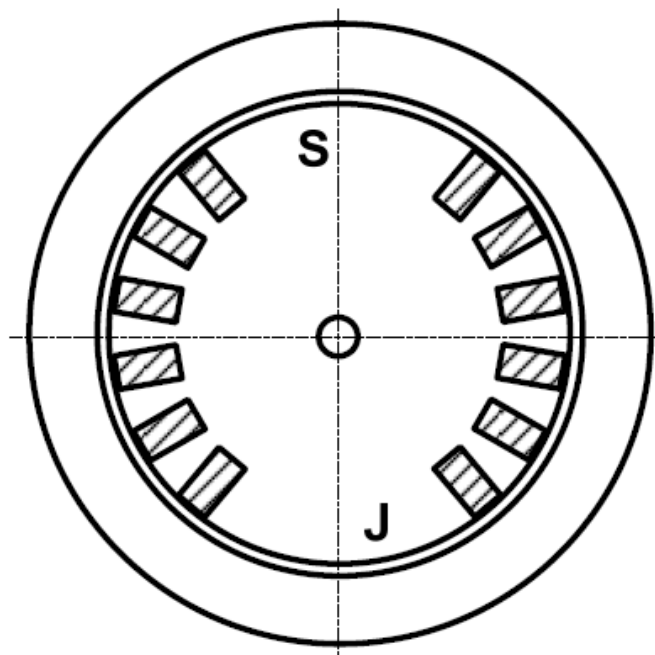
Konstrukční návrh synchronního stroje se provádí ve většině případů až po návrhu elektromagnetickém, až jsou známy potřebné rozměry. Metodiky návrhů a výpočtů dosahují v dnešní době velmi vysoké preciznosti. Dalšího zlepšení parametrů stroje pak lze dosáhnout použitím jakostnějších a kvalitnějších materiálů. [1, 2]

Téměř všechny točivé stroje jsou konstruovány tak, že jedna část stroje provádí točivý pohyb - rotor a druhá část je nepohyblivá - stator.

Podle druhu vinutí (nezávisle na druhu proudu ve vinutí) lze točivé stroje rozdělit na stroje s vyniklými póly a na stroje bez vyniklých pólů, tzv. stroje s hladkým rotorem. [1, 2]

1.5.1 Synchronní stroj s hladkým rotorem

- turboalternátory
- turbomotory

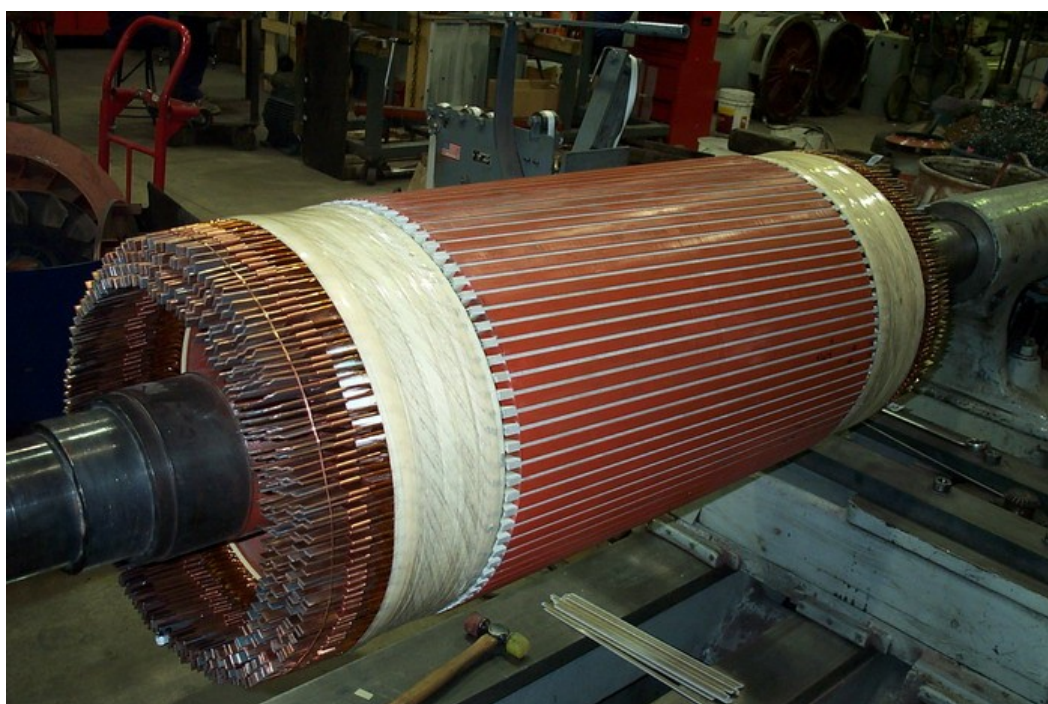


Obr. 4 Synchronní stroj s hladkým rotorem [8]

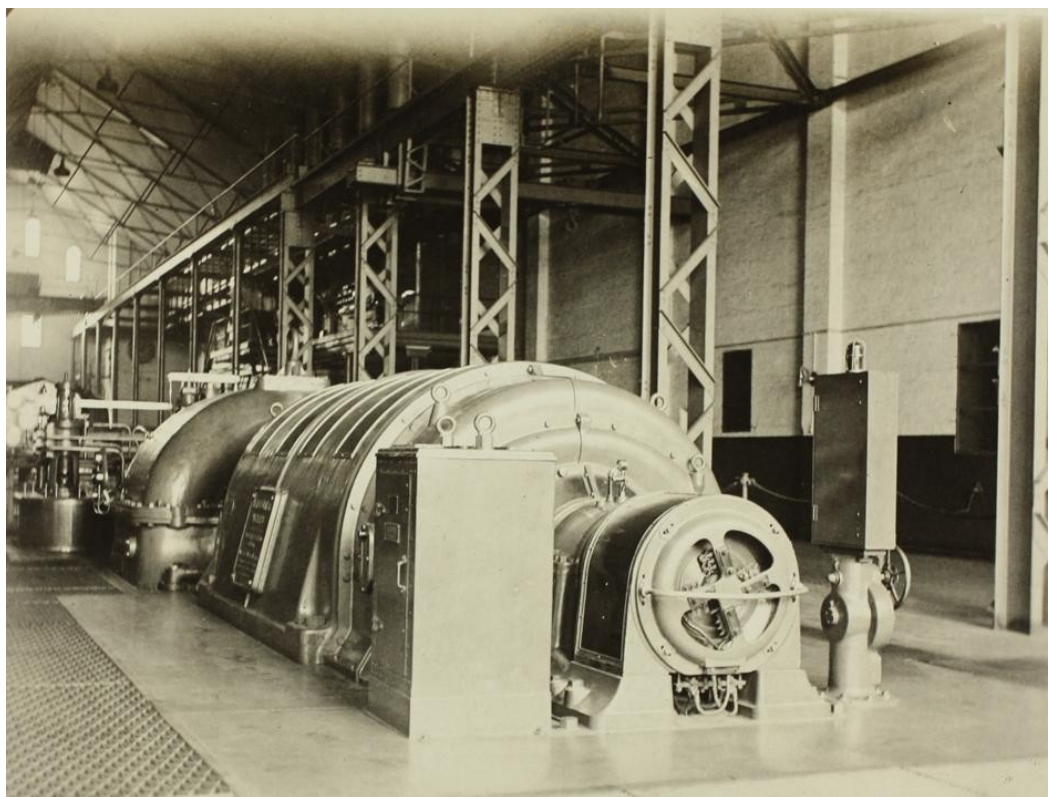
Synchronní stroje s hladkým rotorem jsou stroje rychloběžné o velkých rozměrech, proto tyto stroje mají válcové rotory z oceli velké pevnosti a jsou poháněny parními turbínami. Konstruuji se výhradně dvoupólové ($n=3000\text{min}^{-1}$). Celý magnetický obvod rotoru je vyráběn z výkovku, který plní funkci tlumicího vinutí. Budicí vinutí je uloženo ve vyfrézovaných drážkách v těle rotoru. Vinutí je vyrobeno nejčastěji z plochého měděného vodiče. Vyfrézované drážky

zabírají nejčastěji 2/3 obvodu rotoru a plochý vodič je zaplňuje celé. Na čelech vinutí je nasazena nemagnetická obruč soužící ke stažení vinutí z důvodu velkých odstředivých sil. Konce vinutí jsou připojeny na kroužky a díky kartáčům napájeny z budiče stejnosměrným proudem. Výhodou oproti strojům s vyniklými je ta, že vzduchová mezera je stálá a tím je i stálá magnetická vodivost obvodu, což usnadňuje výpočet. [2, 4, 6, 8]

Rotor turboalternátoru může dosahovat průměru až 1,2m. S rostoucím průměrem rotoru také roste úhlová rychlost a s ní odstředivá síla. Odstředivá síla může narůst na takovou hodnotu, že by mohlo dojít až k poškození pevnosti materiálu rotoru. [2, 4, 6, 8]



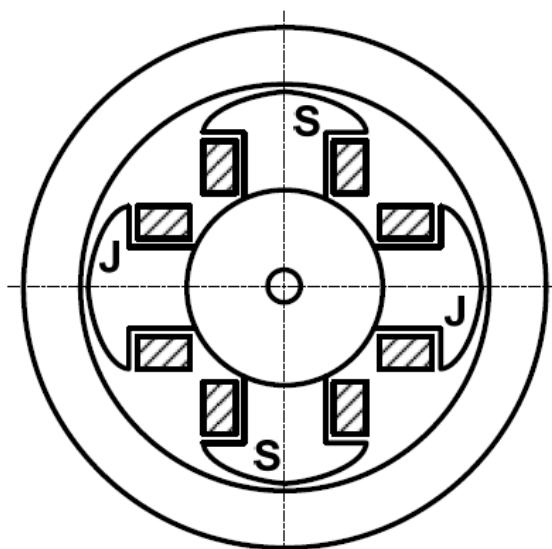
Obr. 5 Rotor turboalternátoru



Obr. 6 Synchronní turboalternátor z roku 1930

1.5.2 Synchronní stroj s vyniklými póly

- hydroalternátory

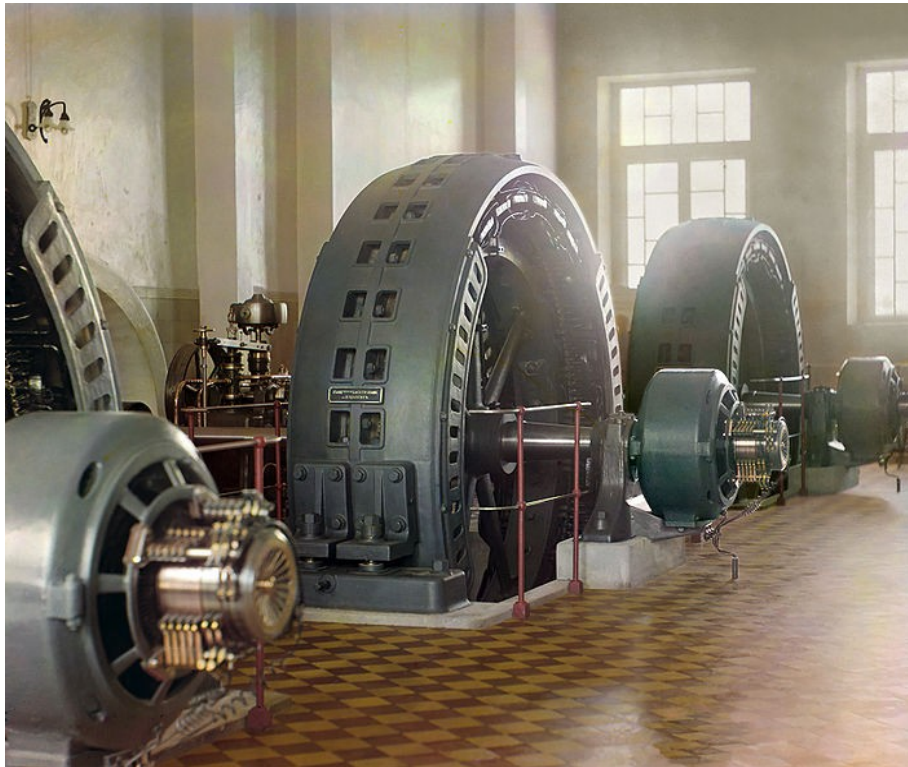


Obr. 7 Synchronní stroj s vyniklými póly [8]

Synchronní stroje s vyniklými póly jsou nejméně čtyřpólové a pohání je rychloběžné vodní turbíny. Často se ale stavějí jako pomaloběžné s hřídelí spojenou s vodní turbínou. Tyto stroje bývají většinou mnoha pólové. Hydroalternátory mají velký průměr a malou délku. Na rotoru se nacházejí pólové nástavce a na nich je navinuto budící vinutí. [6, 8]



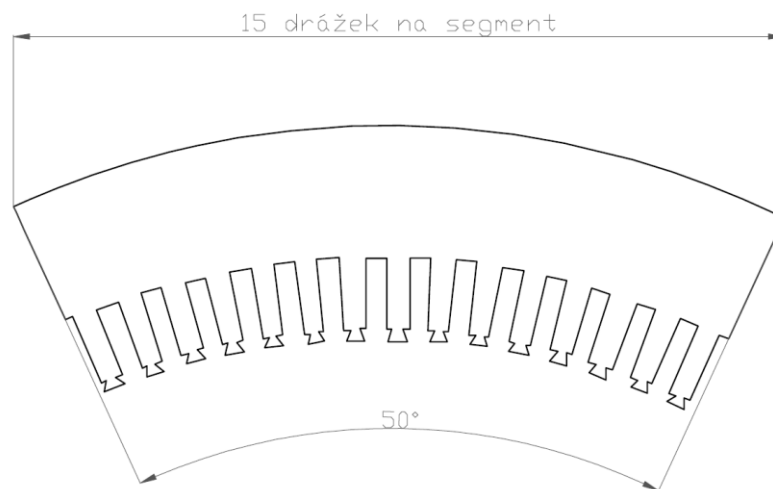
Obr. 8 Rotor hydroalternátoru



Obr. 9 Hydroalternátor

1.5.3 Provedení statorového svazku

Stator se skládá z ocelových plechů určených pro elektrotechniku o tloušťce 0,5 mm legovaných křemíkem a válcovaných za tepla. Statorový plech je u menších průměrů vystřížen z jednoho kusu plechu, při větších průměrech se stator skládá z více vystřížených segmentů. Na vnitřním obvodu statorového plechu se lisují drážky požadovaného tvaru do nichž se ukládá statorové vinutí. Statorové plechy se skládají do paketů a pakety se pak skládají do celých statorových svazků. Mezi pakety se vkládají ventilační výztuhy tvořící radiální kanály o šířce 10 mm. [1]



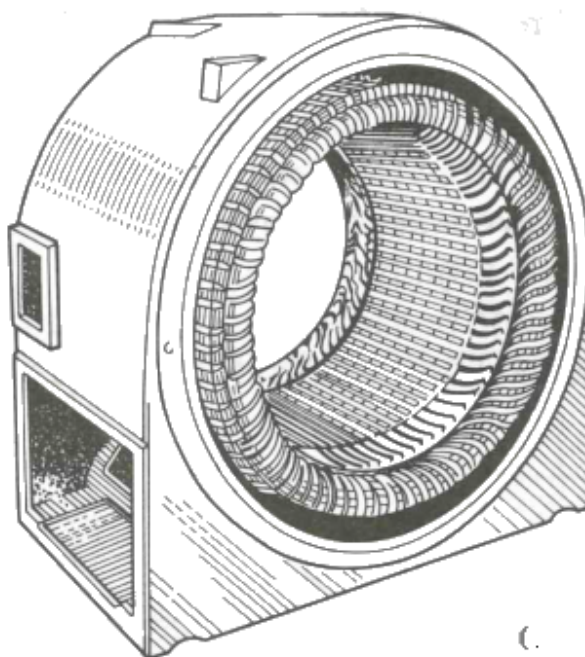
Obr. 10 Statorový segment [14]

1.5.4 Kostra statoru

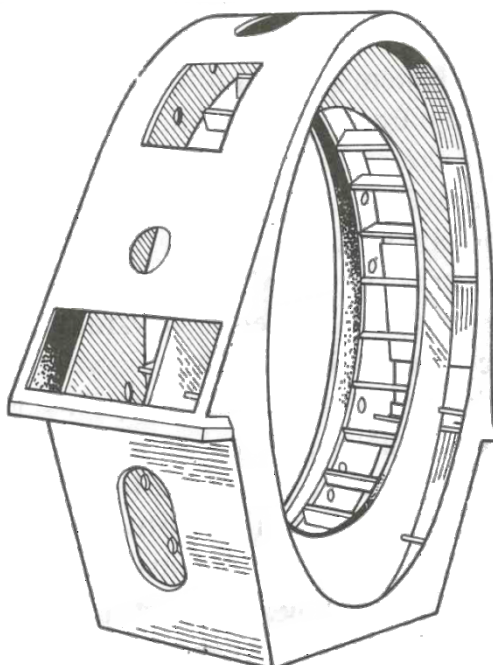
Kostra statoru tvoří nosný celek pro statorový svazek. Kostra statoru je buď svařovaná z železných plátů a bezešvých trubek, litá nebo lisovaná z plechu. Konstrukce kostry se odvíjí nejen od druhu krytí daného stroje, ale také od jeho tvaru podle uložení hřídele. Pro účinnější chlazení statorového svazku jsou mezi podélnými žebry vytvořeny chladicí kanály. Pomocí nosných žebër je pak statorový svazek připevněn do skříňové konstrukce. [1, 4]

Kostra svařovaná z železných plátů je většinou skříňové konstrukce. Hojně se používá konstrukce, kde jedna z krajních stěn konstrukce tvoří stahovací desku statorového svazku. Na tuto krajní stěnu kostry se vloží statorový svazek. Po vložení statorového svazku dojde k jeho slisování a k přivaření stahovacího kruhu ke stěně. [1, 4]

Připevnění stroje zajišťují vhodně tvarované patky, které zaručí spolehlivý přenos sil od točivého momentu na základy. Pro snadnou montáž na základový rám a přístup ke kotvicím šroubům musí být patky vhodně umístěny. Pro přemísťování stroje musí být na kostře umístěny pevnostně odpovídající závěsy, které zaručí bezpečnou a snadnou manipulaci. Malé stroje mají na své kostře umístěny závěsné šrouby neboli oka zašroubována do vhodně umístěných nálitků. [1, 4]



Obr. 11 Litá kostra s navinutým rotorovým svazkem [1]



Obr. 12 Svařovaná kostra [1]

1.5.5 Provedení rotoru

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, rotor synchronního stroje je buď s vyniklými póly nebo bez vyniklých pólů.

1.5.6 Provedení hřídele

Stroje menších výkonů se ve většině případů navrhují s vodorovně uloženým hřídelem, který je zatížen otáčejícími se částmi, silami točivého momentu a silami způsobenými převody (např. řemenovými a zubovými). Další síly působící na hřídel jsou síly při přímém spojení hnaného a hnacího stroje. Hřídel musí být tedy dimenzována tak, aby provozními zatíženími nevznikly trvalé problémy a deformace. Je tedy nutné vyvarovat se především tzv. kritickým otáčkám, které způsobují rezonanční rozkmitání hřídele a následnou havárii rotoru. Kritické otáčky se vyskytují například při rozběhu stroje. Vztah pro výpočet kritických otáček:

$$n_k \approx 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{y_T}{e_0}}{y_G}} \quad (\text{min}^{-1}) \quad (1.3)$$

kde	y_T	ustálený průhyb (m)
	e_0	počáteční excentricita (m)
	y_G	průhyb (m)

Hřídel je nejvíce namáhanou částí elektrického stroje. Vyrábí se z kvalitních uhlíkových konstrukčních ocelí třídy 11, popřípadě z ocelí třídy 12. Hřídel je vyrobena z jednoho souvislého kusu oceli. Průměr hřídele bývá odstupňován a na největším průměru hřídele je uložen rotorový svazek. Průměr dalších osazení je dán dalšími konstrukčními částmi uložených na hřídeli. Mezi tyto části patří například ventilátor a valivá ložiska. [1, 4]

1.5.7 Provedení střídavých vinutí

Střídavá vinutí se dělí na vinutí vsypávaná, vinutí z polotuhých a tuhých cívek, vinutí tyčová, vinutí nakrátko a tlumící vinutí.

Vsypávané vinutí se vsypává neboli vkládá do polozavřených drážek, které mají úzký otvor, kterým se postupně vodiče vkládají do drážky. Pokud je navíjení prováděno strojově, pak se dráty navíjí jednotlivě a nebo se navinou předem skupiny cívek, které se následně vtáhnou do potřebných drážek. Jelikož se u vsypávaného vinutí používají dráty do průměru 1,8 mm z důvodu tuhosti drátu, pak se potřebného průřezu vodiče dosáhne použitím paralelních vodičů. Aby se při návrhu stroje snížil počet paralelních vodičů, volí se vinutí s několika paralelními větvemi. [1, 4]

2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ VE STAVBĚ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

2.1 Materiály pro magnetické obvody

Magnetické obvody elektrických strojů se vyrábějí z tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku, tzv. elektrotechnických plechů nebo z lité oceli na odlitky a dalších magnetických materiálů. Plechy pro elektrotechniku se vyrábějí z co nejčistší oceli. Ingoty jsou postupně válcovány s mezhřevy. Některé plechy se válcují výhradně za tepla a některé vyžadují kombinaci válcování za tepla i studena. Válcované plechy se nejčastěji vyrábí progresivní technologií v kyslíkových konvertorech při dodržení požadovaného chemického složení a daných postupech válcování. Plechy jsou dodávány ve svitcích, pásech, případně tabulích. [1, 3]

Elektrotechnické plechy dělíme do dvou základních skupin, na orientované a neorientované. Orientované plechy jsou vyráběny válcováním za studena a mají lepší magnetické vlastnosti ve všech směrech. Používají se nejčastěji pro výrobu magnetických obvodů elektrických přístrojů, např. přístrojových transformátorů. Neorientované plechy jsou vyráběny válcováním za studena mají stejné magnetické vlastnosti ve všech směrech a používají se především pro výrobu magnetických obvodů točivých strojů. Neorientované, tzv. dynamo plechy jsou také známy pod anglickým názvem Non-oriented electrical steel. [1, 3]

Dále se dělí podle obsahu křemíku, jehož obsah může být až 5 %. Obsah křemíku značně ovlivňuje vlastnosti oceli. Ocel s menším obsahem křemíku má poměrnou permeabilitu menší a měrné ztráty větší. Ocel s vysokým obsahem křemíku má menší hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy a vysokou poměrnou permeabilitu. Křemík zvětšuje rezistivitu a zmenšuje hustotu oceli. Ocel s příměsí křemíku až 2 % má rezistivitu $0,25 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ a hustotu $7800 \text{ kg} \cdot m^{-3}$. Ocel s příměsí křemíku až 5 % má rezistivitu $0,5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ a hustotu $7550 \text{ kg} \cdot m^{-3}$. [1, 3]

Dynamo plechy musí být vyráběny v souladu s normou EN 10106/2007 nebo japonskou normou JIS C 2552/2000. Vyrábí se standardně v jakostech např. M270-35A, M350-50A, M530-50A, M800-50A. Plechy jsou vyráběny s běžnou izolací po obou stranách nebo bez izolace. Tloušťka izolace se pohybuje v rozmezí 0,5 - 10 μm . Typ izolace se značí nejčastěji symbolem C3, C5 a C6. Plechy se vyrábí nejčastěji o tloušťce 0,35 mm, 0,5 mm a 0,65 mm. Základní technické parametry daných dynamo plechů jsou uvedeny v příloze. [1, 3]

2.2 Materiály pro vodiče

Nejčastěji používaný materiál na vodiče při stavbě elektrických strojů je především měď a hliník. Veškeré výrobky z mědi se pro potřeby elektrotechnického průmyslu vyrábí válcováním, lisováním nebo tažením. Metodou tažení lze získat měděné vodiče o průměru od 0,005 mm, pásové vodiče o tloušťce 0,1 mm a fólie tenké od 0,008 mm. Aby nedocházelo v mědi k lokálnímu hutnění a k vnitřnímu pnutí vlivem mechanických deformací, využívá se tepelného zpracování.

Dále se také využívá při výrobě elektrických strojů hliník, jehož vodivost umožňuje široké použití v elektrotechnickém průmyslu. Důležitou vlastností hliníku je jeho malá hustota (3,3krát menší než u mědi), nízká teplota tavení a dobrá plastičnost. Dále se také používají mosazi a bronzы a to pro výrobu rotorových vinutí asynchronních motorů nakrátko a tlumících vinutí synchronních strojů. Mosazi a bronzы se dobře obrábějí, mají malou tepelnou roztažnost a lze je použít pro vodivé součásti složitých tvarů. [1, 3]

2.3 Izolační materiály

Izolační materiály se používají k izolaci částí, které se nacházejí na různém elektrickém potenciálu. Izolační materiály mohou být plynné, kapalné a pevné. Ve výrobě elektrických strojů se používají především izolační materiály pevné. Tloušťka mezizávitové a drážkové izolace částečně určuje rozměry a hmotnost stroje. Dovolena oteplení stroje určuje tepelná stálost a tepelná vodivost izolace a tím určuje kvalitu elektrického stroje. Technický život elektrického stroje je tedy dán technickým životem izolace. Při otepleních izolace dochází ke stárnutí izolace a tím ke zhoršení izolačních vlastností. Izolační materiály používané při stavbě elektrických strojů se rozdělují do tříd povolených teplot (např.: Y, A, E, B, F, H, C). Každá tepelná třída zahrnuje materiály odpovídající mezní teplotě dané tepelní třídy. [1, 3]

Jako izolační materiály se nejčastěji používají vlákninová celulóza, bavlna, slída, skelné vlákno. Jmenované materiály se pro zlepšení izolačních vlastností mohou napouštět nebo pokrývat laky na bázi přírodních a syntetických pryskyřic. Jako izolanty se také používají elektrotechnické papíry a lepenky, fibr, vrstvené izolační materiály jako je např.: pertinax, sklotextil a další. [1, 3]

Pro impregnaci vinutí elektrických strojů se používají impregnační laky, které zpevňují vinutí a zlepšují tepelnou vodivost a tím i odolnost proti vlhkosti. Laky jsou vytvrzované za tepla nebo za studena. [1, 3]

2.4 Vodiče pro vinutí

Vodiče pro vinutí se vyrábí z mědi nebo z hliníku s kruhovým nebo pravoúhlým průřezem. Zařazení do teplotní třídy určuje izolace. Vodiče kruhového průřezu, nebo-li dráty, se používají nejčastěji. Pro zlepšení činitele plnění se vodiče lakují, protože mají asi 2krát menší tloušťku izolace než vodiče opředené bavlnou nebo hedvábím. [1, 3]

U strojů vyšších výkonů s navrženými drážkami pravoúhlého průřezu se používají nejčastěji vodiče pravoúhlého průřezu. Tyto vodiče mají stejné izolace jako vodiče kruhového průřezu a vyrábí se v různých průřezích. [1, 3]

2.5 Konstrukční materiály

Mezi konstrukční materiály elektrických strojů patří materiály, ze kterých se zhotovují části stroje nesoucí mechanická zatížení a slouží ke spojení všech částí stroje v jeden celek. [1, 3]

K výrobě konstrukčních částí stroje se používá ocel na odlitky. U synchronních strojů s hladkým rotorem se z oceli na odlitky vyrábí rotor. U synchronních strojů s vyniklými póly pro změnu těleso rotoru a póly. Dále se z této oceli také vyrábí ložiskové štíty. [1, 3]

Litina se používá k výrobě koster strojů, pouzdra, ložiskové štíty, spojky a další. Nejčastěji se používá temperované litiny, která má lepší houževnatost a odolnost proti opotřebení. [1, 3]

Dále se používá válcovaná ocel dodávaná v širokém sortimentu. Nejčastěji se využívají kruhové, čtvercové a šestihranné profily, trubky, plechy a další různé výrobky. [1, 3]

Z barevných kovů se nejčastěji používá hliník a jeho slitiny s mědí a cínem, především na kostry. Dalšími materiály z barevných kovů jsou bronz, používající se k výrobě součástí, které musí odolávat velkým třením. [1, 3]

3 SYNCHRONNÍ MOTOR

Synchronní motor pracuje se stálou synchronní rychlostí, to umožňuje použití tam, kde je požadováno stálých a neměnných otáček hřídele nezávislých na zatížení. Dále se synchronní motory používají tam, kde je potřeba téměř nepřetržitého provozu. Synchronní motory mají uplatnění jako pohony ventilátorů, čerpadel, kompresorů a dalších různých zařízení. [4, 5, 6]

Výkony synchronních motorů mohou být až stovky tisíc kW. Vyrábějí se ale i motory s menším výkonem pohybujícím se okolo několika W. Mezi tyto menší synchronní motory patří například reakční synchronní motor a synchronní hysterezní motor. [4, 5, 6]

Výhody a nevýhody synchronních motorů:

Mezi výhody patří:

- konstantní otáčky při různém zatížení
- nepotřebuje odebírat ze sítě jalový výkon
- vyšší účinnost (běžně nad 90%)

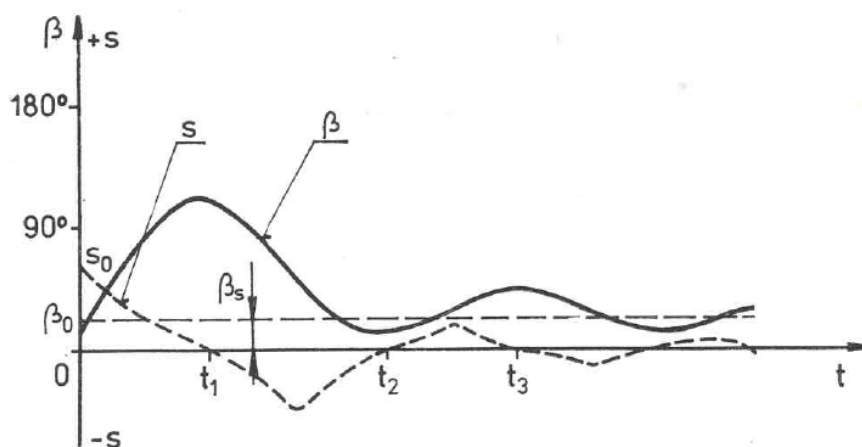
Mezi nevýhody patří:

- složitější konstrukce
- složitější obsluha
- vyšší výrobní náklady

3.1 Spouštění synchronního motoru

Synchronní stroj lze užít jako motor i jako generátor. V případě motoru se na statorové vinutí přivádí síťové napětí, na kroužky spojené s budícím vinutím na rotoru se přivádí budící proud. [4, 5, 6]

Pro rozběh synchronního motoru se dříve využívalo asynchronních motorů připojených pomocí spojky k hřídeli rozbíhaného motoru. Asynchronní motor roztočí rotor synchronního stroje přibližně na synchronní otáčky a poté dojde k připojení síťového napětí na synchronní motor. Rotor je pak vtažen do synchronismu s točivým polem statoru. [4, 5, 6]



Obr. 13 Průběh vtažení synchronního motoru do synchronismu [4]

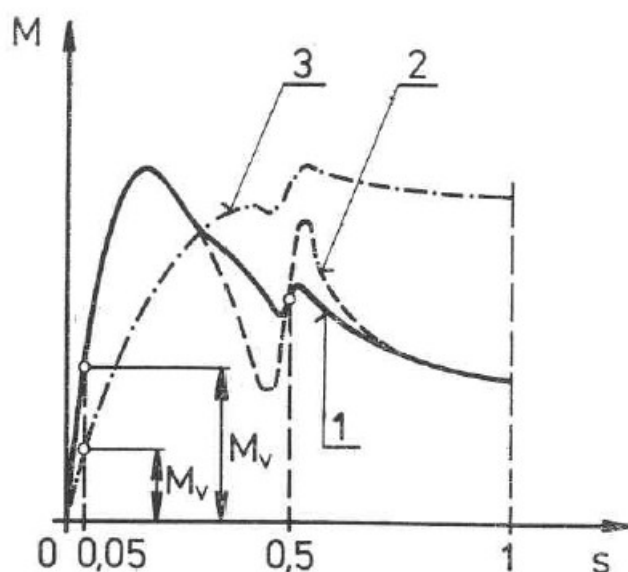
Rozběh synchronního motoru lze lépe popsat na výše uvedeném znázornění. V čase $t = 0$ se rotor otáčí se skluzem $s = s_0$ a na rotor působí dva elektromagnetické momenty:

- asynchronní moment M_a
- synchronní moment M_s

Jelikož se rotor otáčí s postupným zrychlením, skluz s se postupně zmenšuje. V čase $t = t_1$ dosáhne rotor synchronních otáček. V časovém úseku t_1 až t_2 pracuje rotor se záporným skluzem, dochází ke zpomalování rotoru a ke snižování zátěžného úhlu β . V čase $t = t_2$ rotor opět dosáhne synchronních otáček. V časovém úseku t_2 až t_3 dojde k opětovnému zpomalení a ztracení synchronních otáček. V čase $t = t_3$ rotor opět dosáhne synchronních otáček. K tomuto kolísání otáček rotoru dochází až do doby, kdy je rotor vtažen do synchronismu a zátěžový úhel β nedosáhne stabilní hodnoty β_s . Celý proces vtažení synchronního motoru do synchronismu lze urychlit zvýšením asynchronního a synchronního momentu v oblasti skluzů v oblasti $s = 0$. [4]

V dnešní době se používá pro rozběh synchronního motoru frekvenční měnič. Frekvenční měnič díky změně kmitočtu napájecího napětí rozbíhá synchronní motor postupně až na jmenovité otáčky. [4]

Další možnost rozběhu synchronního stroje je pomocná asynchronní klec umístěná v pólových nástavcích. Tato konstrukční úprava funguje tak, že po připojení napájecího napětí k synchronnímu motoru funguje klec nakrátko, jako u asynchronního motoru. Po roztočení rotoru na otáčky blízké synchronním (přibližně $0,95n_s$) dojde k připojení buzení, vybuzení rotoru a vtažení rotoru do synchronismu. Budicí vinutí je během asynchronního rozběhu spojeno nakrátko pomocí ochranného odporu. Tento odpor omezí velikost indukovaného napětí v budícím vinutí a zabrání případně možnému poškození. [4]



Obr. 14 Momentová charakteristika synchronního motoru při asynchronním rozběhu; 1 - uzavřené budící vinutí přes odpor, 2 - zkratované budící vinutí, 3 - uzavřené budící vinutí přes odpor, rozběhové vinutí vyrobeno z materiálu s velkým odporem [4]

Další konstrukční úprava umožňující rozběh synchronního motoru je umístění pomocného vinutí na rotor. Pomocné vinutí na rotoru je spojeno s kroužky a princip spouštění je shodný jako u asynchronního motoru s kroužkovou kotvou. Jakmile se stroj rozběhne, přepojí se vinutí na stejnosměrný proud. [2, 7, 8]

3.2 Charakteristiky synchronního motoru

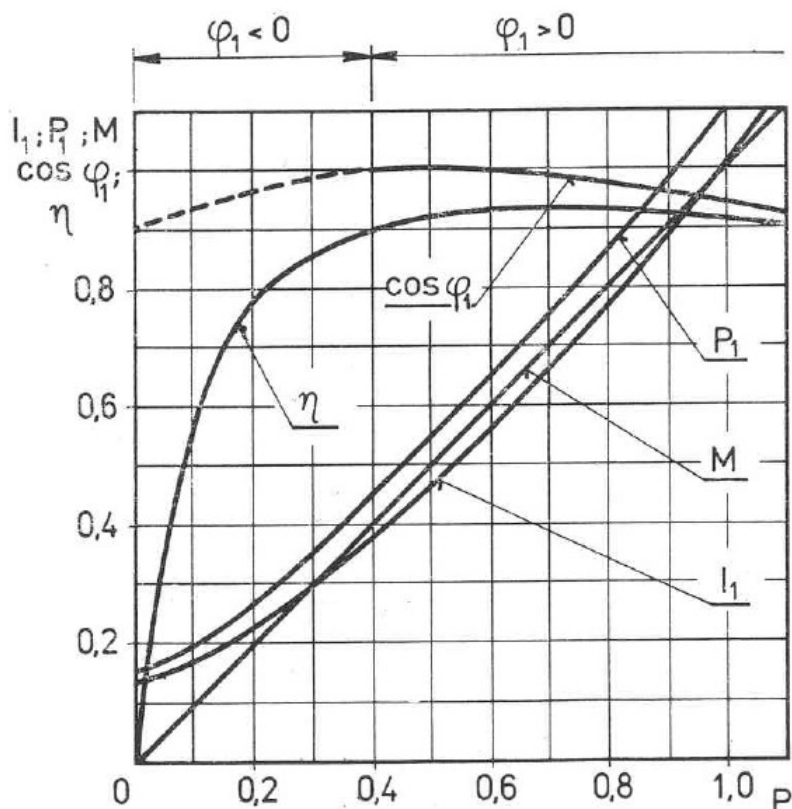
Základními charakteristikami synchronního motoru jsou charakteristiky zatěžovací, závislost činného a jalového výkonu na vnitřním úhlu a V-křivky. Pro sestavení uvedených charakteristik slouží fázorový diagram.

3.2.1 Momentová charakteristika synchronního motoru

Momentová neboli mechanická charakteristika udává točivý moment motoru v závislosti na jeho skluzu nebo rychlosti otáčení při jmenovitém napětí statoru. [7, 8]

3.2.2 Zatěžovací charakteristiky synchronního motoru

Zatěžovací charakteristiky graficky znázorňují závislosti hlavních provozních veličin motoru (výkonu, satorového proudu, účinníku, účinnosti a skluzu) na jeho činném příkonu, odebíraném z napájecího zdroje při jmenovitém napětí statoru. [4]

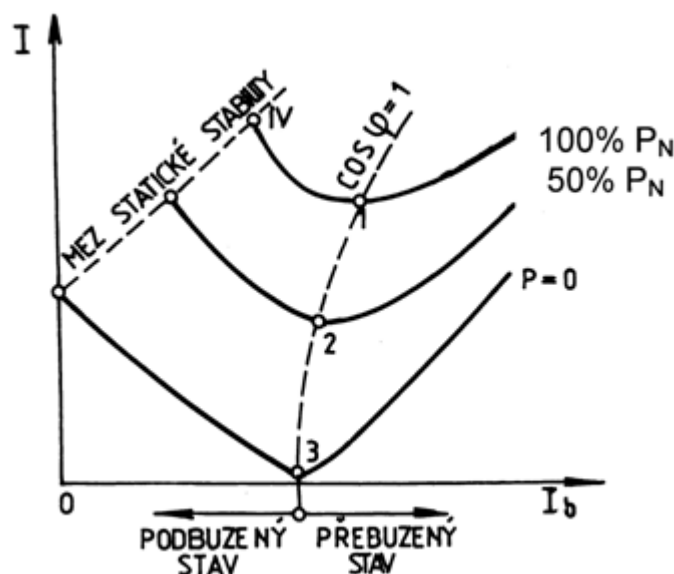


Obr. 15 Zatěžovací charakteristiky synchronního motoru [4]

3.2.3 V-křivky synchronního motoru

V-křivky lze získat pomocí měření nebo sestavit pomocí kruhového diagramu. V-křivky synchronního motoru jsou podobné křivkám alternátoru. V-křivka pro $P = 0$ je mezní křivkou.

Při měření V-křivek synchronního motoru se hřídel zatíží stálým jmenovitým výkonem, jmenovité napětí a jmenovitá frekvence je konstantní. Při postupném zvyšování budicího proudu se mění satorový proud, až je dosaženo minimální hodnoty satorového proudu. Tato minimální hodnota je minimem V-křivky. Dalším zvyšováním budicího proudu se zvýší satorový proud až na hodnotu jmenovitého proudu. Další V-křivka se změní změnou jmenovitého výkonu. [4]



Obr. 16 V-křivky synchronního motoru při konstantním jmenovitém výkonu [14]

Na výše uvedeném obrázku jsou znázorněny V-křivky synchronního stroje. V-křivka pro hodnotu $P=0$ platí pro synchronní motor v chodu naprázdno. V-křivka pro hodnotu $100\% P_N$ platí pro stálé jmenovité zatížení motoru. Křivka účinníku $\cos\varphi=1$ dělí celou pracovní oblast motoru na oblast podbuzeného motoru a na oblast přebuzeného motoru. V podbuzeném stavu je motor spotřebičem jalového výkonu a pracuje s induktivním účinníkem. V přebuzeném stavu motor dodává jalový výkon a pracuje s kapacitním účinníkem. [4]

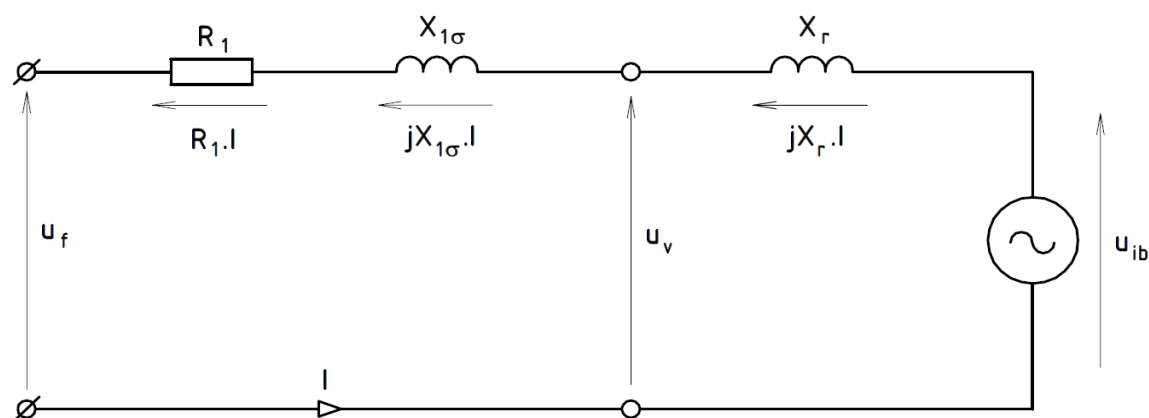
3.3 Synchronní kompenzátory

Pro kompenzaci jalového výkonu lze použít synchronní stroj pracující v přebuzeném stavu naprázdno. Přebuzený synchronní motor se pak jeví jako kondenzátor. Motor tedy neodebírá žádný činný výkon. [9]

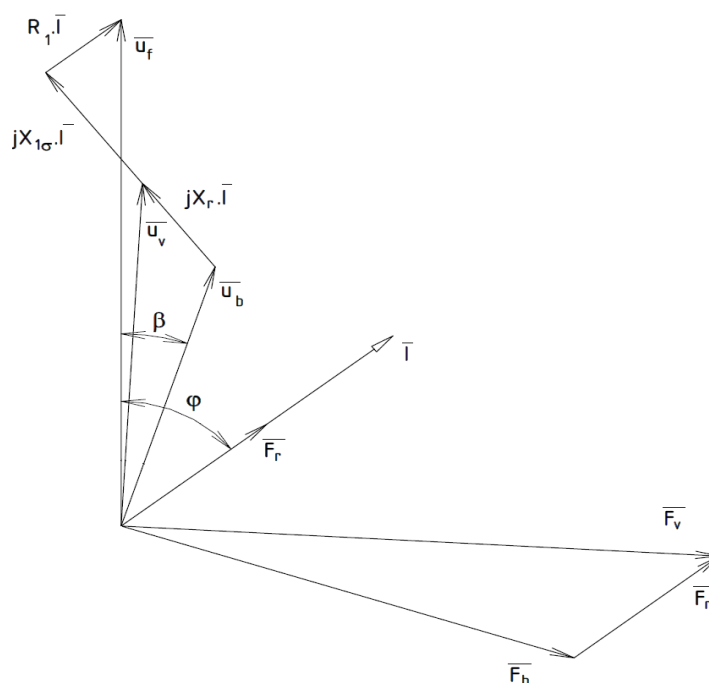
Kompenzační výkon lze měnit plynule a to buzením. To znamená, že změnou velikosti budícího proudu I_b lze provádět regulaci dodávky nebo spotřeby jalového výkonu. Změnou budícího proudu se může měnit účinník v oblasti induktivní (podbuzený stav) a také v oblasti kapacitní (přebuzený stav). Cílem kompenzace je snížit jalovou složku proudu, a tím snížit ztráty. Díky tomu patří kompenzace jalového výkonu mezi základní prostředky pro snížení ztrát v elektrizační síti. [9]

4 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR

4.1 Náhradní schéma synchronního stroje



Obr. 17 Náhradní schéma synchronního generátoru s hladkým rotorem [14]



Obr. 18 Fázorový diagram synchronního generátoru s hladkým rotorem [6]

4.2 Základní charakteristiky synchronního generátoru

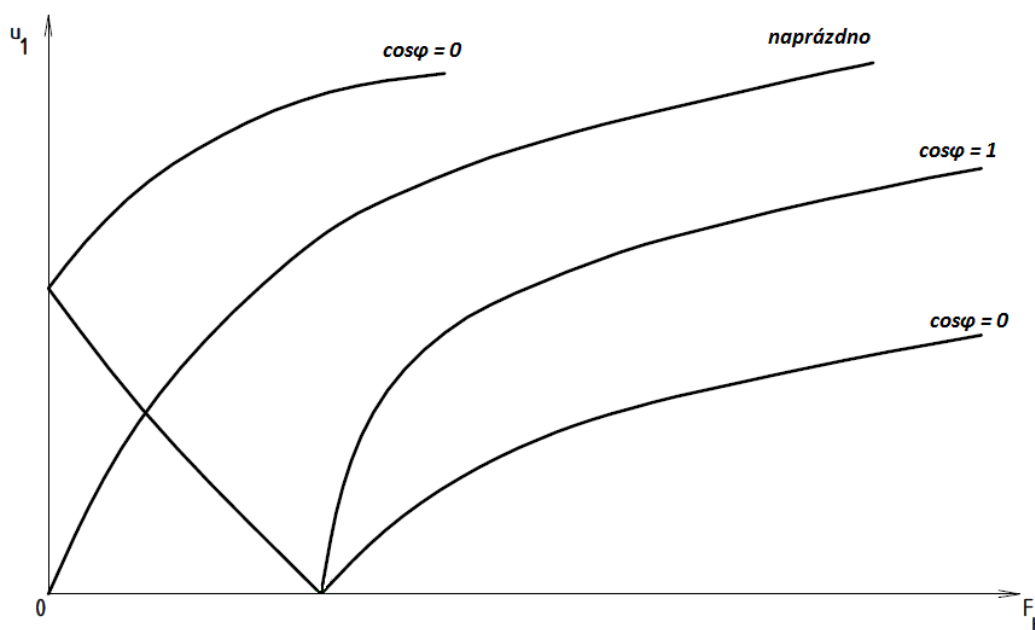
4.2.1 Charakteristika regulační

Regulační charakteristika synchronního generátoru znázorňuje závislost budicího proudu na satorovém proudu za předpokladu konstantního napájecího napětí, účinníku $\cos\varphi$ a otáček. Regulační charakteristika udává, jak je zapotřebí měnit při změně zátěže budicí proud, aby svorkové napětí zůstalo stále konstantní. Regulační charakteristiku lze určit graficky pomocí fázorových diagramů a měřením. [1, 4]

4.2.2 Indukční charakteristika

Indukční charakteristika vyjadřuje závislost svorkového napětí na budícím proudu při konstantním satorovém proudu I_s , otáčkách a účinníku $\cos\varphi$. [1, 4]

Indukční charakteristiku lze odvodit z charakteristiky naprázdno, protože charakteristika naprázdno je tzv. indukční charakteristika za nulového zatížení. [1, 4]



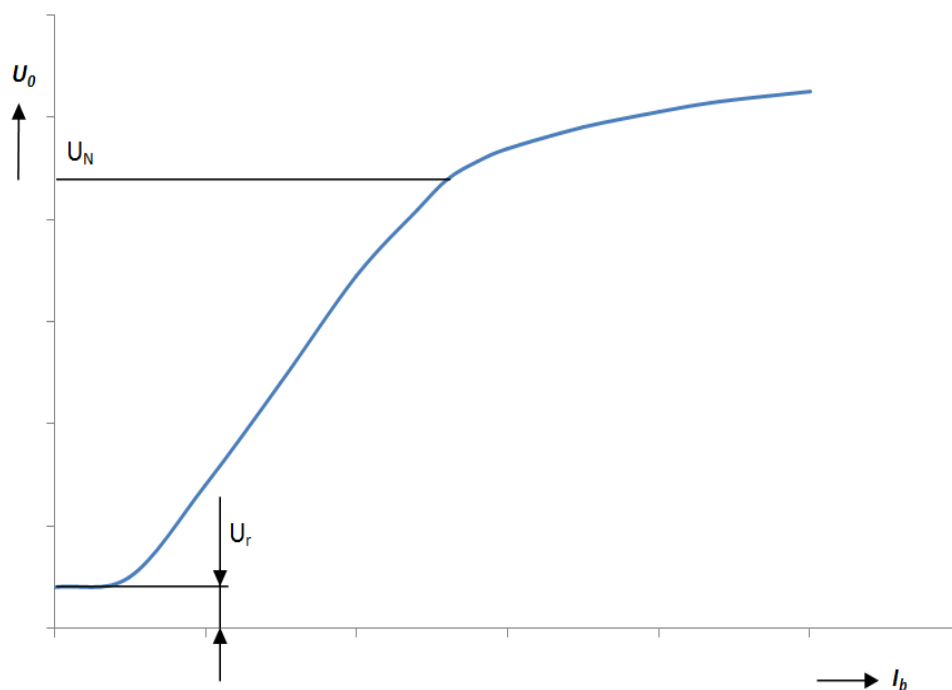
Obr. 19 Indukční charakteristika [14]

4.2.3 Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno, tzv. magnetizační charakteristika, určuje závislost vnitřního indukovaného napětí na budícím proudu. Magnetizační charakteristika udává vlastnosti magnetického obvodu a ztráty při chodu naprázdno. Vnitřní indukované napětí je při konstantních otáčkách stroje úměrné magnetické indukci nebo magnetickému toku stroje. Budicí proud

je úměrný intenzitě magnetického pole. Průběh charakteristiky naprázdno bude záviset na vlastnostech použitého materiálu na magnetický obvod stroje. [1, 4, 10]

Při měření charakteristiky naprázdno u synchronního generátoru je stroj v nezátíženém stavu poháněn pomocným cejchovaným pohonem nebo elektrickým dynamometrem. Při konstantních otáčkách je nastavován budicí proud. Velikost indukovaného napětí stroje se mění shora dolů, tzn. od napětí $U_0 = 1,25 U_n$ až do remanentního napětí U_r . [1, 4, 10]

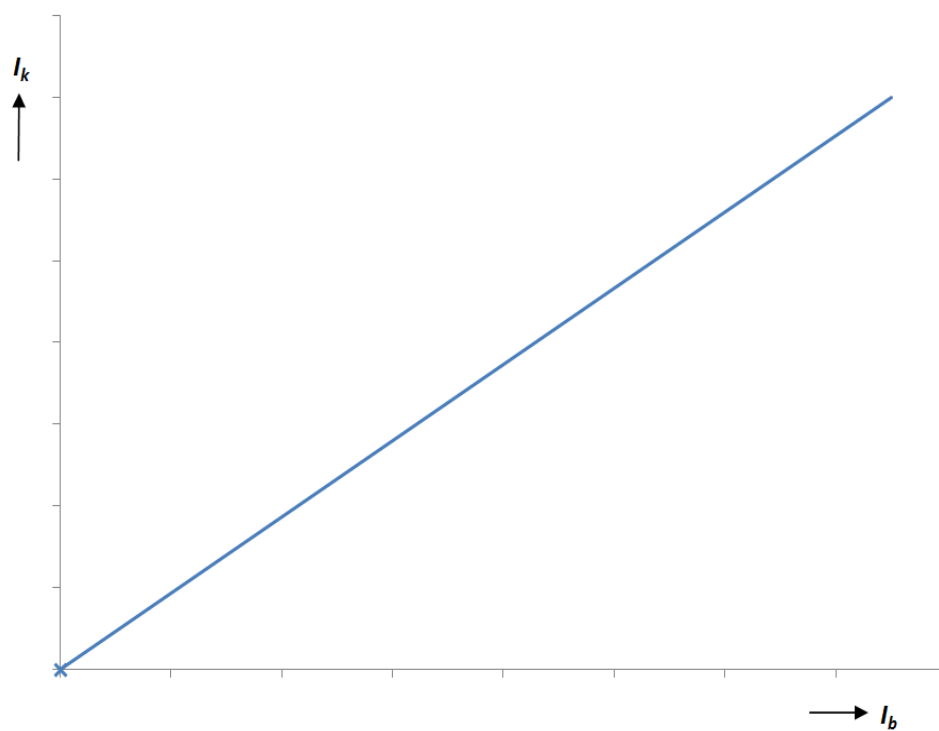


Obr. 20 Charakteristika naprázdno synchronního generátoru

4.2.4 Charakteristika nakrátko

Charakteristika nakrátko udává závislost proudu nakrátko I_k na proudu budícím I_b . Průběh charakteristiky má tvar přímky s lineárně rostoucím trendem. Při měření nakrátko pracuje stroj s nepatrným magnetickým tokem. [1, 4, 10]

Měření nakrátko je zkouška, při které pracuje stroj jako generátor se svorkami spojenými nakrátko. Měřením nakrátko lze zjistit rozptylové poměry stroje a také velikost ztrát nakrátko. Z naměřených hodnot lze určit charakteristické hodnoty stroje při zkratu. [1, 4, 10]



Obr. 21 Charakteristika nakrátko synchronního generátoru

5 NÁVRH SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

V praktické části diplomové práce byl proveden návrh synchronního generátoru podle daných parametrů a požadavků. Hlavním úkolem bylo vytvořit model daného synchronního generátoru v programu ANSYS Maxwell a dosáhnout co nejlepší shody s naměřenými hodnotami vyrobeného stroje. Jedná se o dvanácti pólový speciální synchronní generátor pracující v podbuzeném stavu vyrobený firmou G&Em s.r.o., sloužící jako pohon pro vlastní zkušebnu o zdánlivém výkonu generátoru 4000 kVA a činném výkonu asynchronního motoru 400 kW. Celý stroj se skládá z bezkartáčového budiče, usměrňovače a samotného generátoru.

Daný synchronní generátor umožňuje vhodným propojením cívek statorového vinutí dodávat různá výstupní napětí. V diplomové práci bylo řešeno zapojení do hvězdy s výstupním napětím $U_N = 6,6 \text{ kV}$ a zapojení do trojúhelníka s výstupním napětím $U_N = 690 \text{ V}$.



Obr. 22 Synchronní generátor vyrobený firmou G&Em

Štítkové hodnoty:

zapojení Y	zapojení D
$S_N = 4000 \text{ kVA}$	$S_N = 4000 \text{ kVA}$
$U_N = 6600 \text{ V}$	$U_N = 690 \text{ V}$
$I_N = 350 \text{ A}$	$I_N = 3347 \text{ A}$
$f = 50 \text{ Hz}$	$f = 50 \text{ Hz}$
$n = 500 \text{ min}^{-1}$	$n = 500 \text{ min}^{-1}$
$\cos\varphi = 0,9$	$\cos\varphi = 0,9$
$\eta = 96,27$	$\eta = 96,27$
$2p = 12$	$2p = 12$
$I_b = 283 \text{ A}$	$I_b = 283 \text{ A}$
$I_{b0} = 140 \text{ A}$	$I_{b0} = 140 \text{ A}$
$J = 1209 \text{ kgm}^2$	$J = 1209 \text{ kgm}^2$

Tab. 1 Tabulka štítkových hodnot

Statorové a rotorové svazky a plechy:

	STATOR	ROTOR
vnější průměr (mm)	1440	1140
vnitřní průměr (mm)	1200	710
vzduchová mezera (mm)	10	
materiál plechů	M350-50A	M800-50A
počet drážek	144	72, dělení 108
délka plechů (mm)	14 x 80 + 13 x 10 = 1250	
natočení	-	1/144

Tab. 2 Tabulka parametrů statorových a rotorových svazků

Statorové a rotorové vinutí:

	STATOR	ROTOR
vodičů v drážce	4 + 4 = 8	16
vodičů celkem	1152	1152
paralelních drátů	2	24
rozměr drátu (mm)	3 x 7,5	Φ 1,8

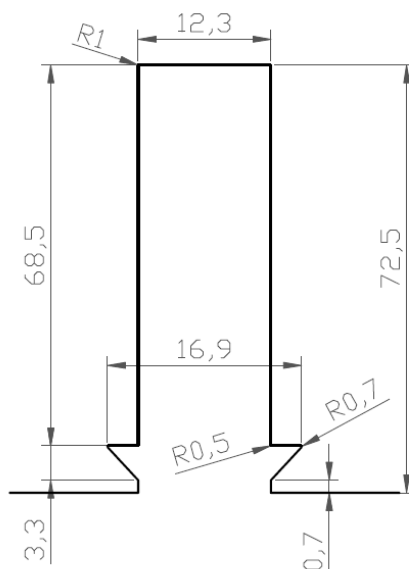
plnění drážky	-	88,3 %
cívkový krok	z 1. do 11.	z 1. do 8.
zkrácení kroku	10/12	-
drážek na pól a fázi	4	6/9
druh vinutí	dvouvrstvé	jednovrstvé
způsob navinutí	vkládané	vsypávané
počet paralelních větví	2	1
střední délka vodiče (mm) (délka v železe + délka čela)	$1250 + 581 = 1831$	$1250 + 320 = 1570$

Tab. 3 Tabulka parametrů statorového a rotorového vinutí

Tlumící vinutí:

počet tyčí	108
průměr tyčí (mm)	7
tloušťka zkratovacích kruhů (mm)	3
materiál tyčí	Cu
materiál kruhů	Cu

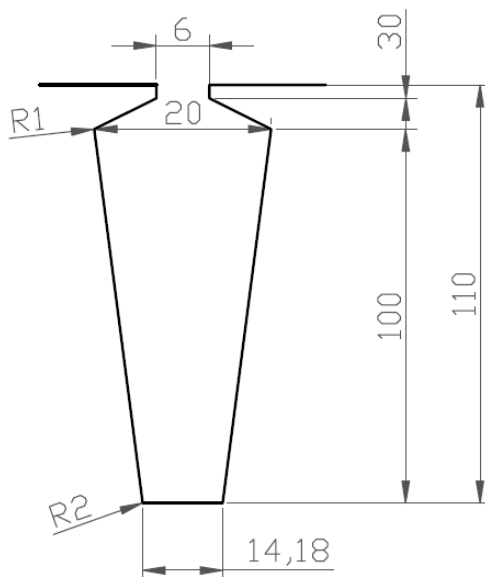
Tab. 4 Tabulka parametrů tlumícího vinutí

Drážka statoru:

Obr. 23 Zakótovaná statorová drážka

Statorová drážka je svými rozměry a tvarem vhodně přizpůsobena pro navinutí vkládaného pásového vinutí. V drážce je umístěno osm pásových vodičů. Vodič je složen ze dvou paralelních drátů o rozměrech jednoho drátu 3 x 7,5 mm.

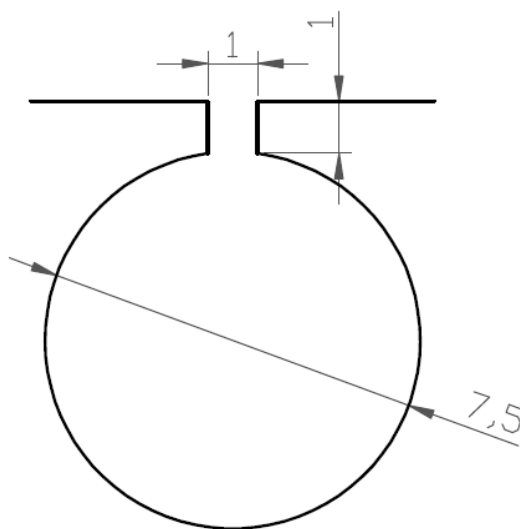
U cívky vinuté ze dvou paralelních pásů se pásy do cívky vkládají vedle sebe na jednu výšku. Tento způsob skládání vinutí v drážce je z důvodu zachování stejné rozptylové reaktance.

Drážka rotoru:

Obr. 24 Zakótovaná rotorová drážka

Do rotorové drážky je navinuto rotorové vsypávané vinutí. Rotorová drážka je svým tvarem přizpůsobena pro vsypávané vinutí, drážka je tzv. polozavřená. V drážce je uloženo 16 vodičů. Vodič je složen z 24 paralelních drátů s průřezem drátu 1,8 mm. Rotorové vinutí má jednu paralelní větev.

Vsypávané vinutí zpravidla nepřevyšuje maximální průměr drátu 1,8 mm a to z důvodu ne příliš velkého činitele plnění drážky a také z důvodu tuhosti drátu.

Drážka tlumiče:

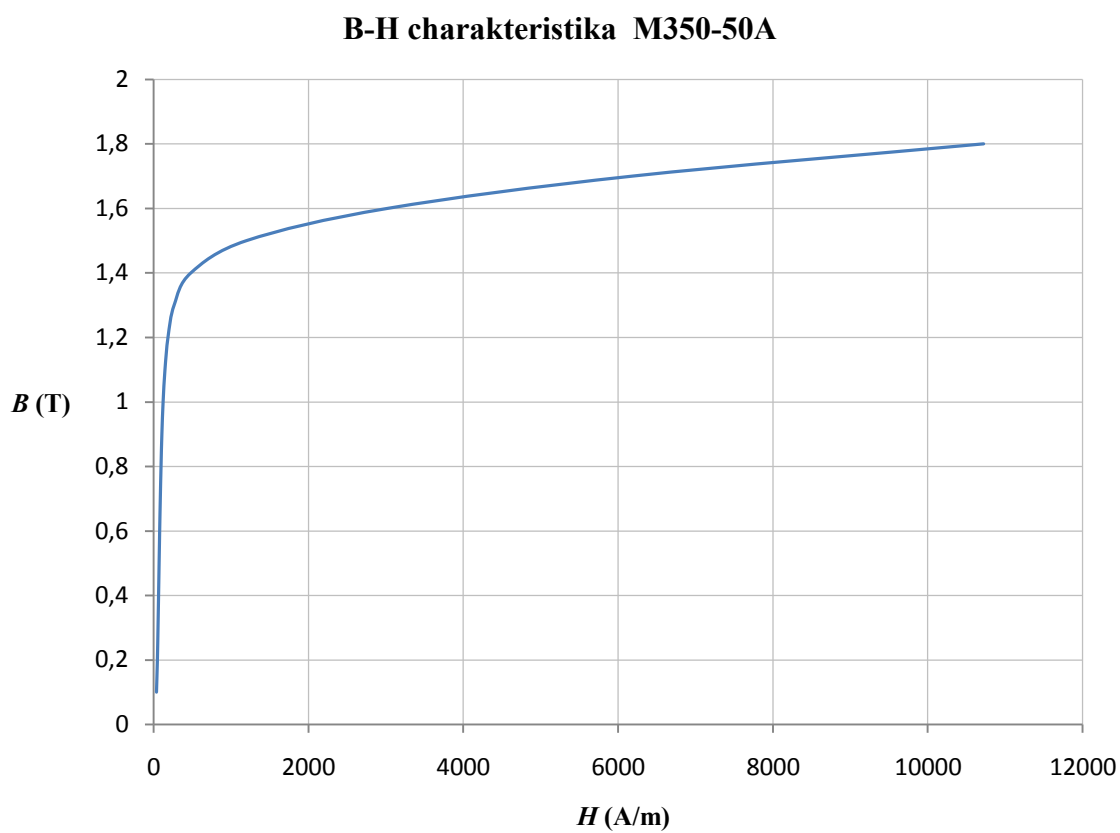
Obr. 25 Zakótovaná drážka tlumiče

V drážce tlumiče je uložena tzv. tlumicí tyč. V každé drážce je nasunuta jedna měděná tyč o průměru 7 mm. Celkem 108 tlumících tyčí je na každé straně spojeno 3 mm tlustým zkratovacím plechem.

Stator:

Statorový svazek je složen ze 14 statorových paketů tloušťky 80 mm. Mezi jednotlivými pakety je výztuhami vytvořeno 13 radiálních ventilačních kanálů u tloušťce 10 mm. Celková délka statorového svazku je tedy $14 \times 80 + 13 \times 10 = 1250$ mm.

Plechý statoru jsou vyrobeny z plechu určeného pro elektrotechniku, konkrétně z materiálu M350-50A, jehož B-H charakteristika je znázorněna v grafu uvedeném níže.

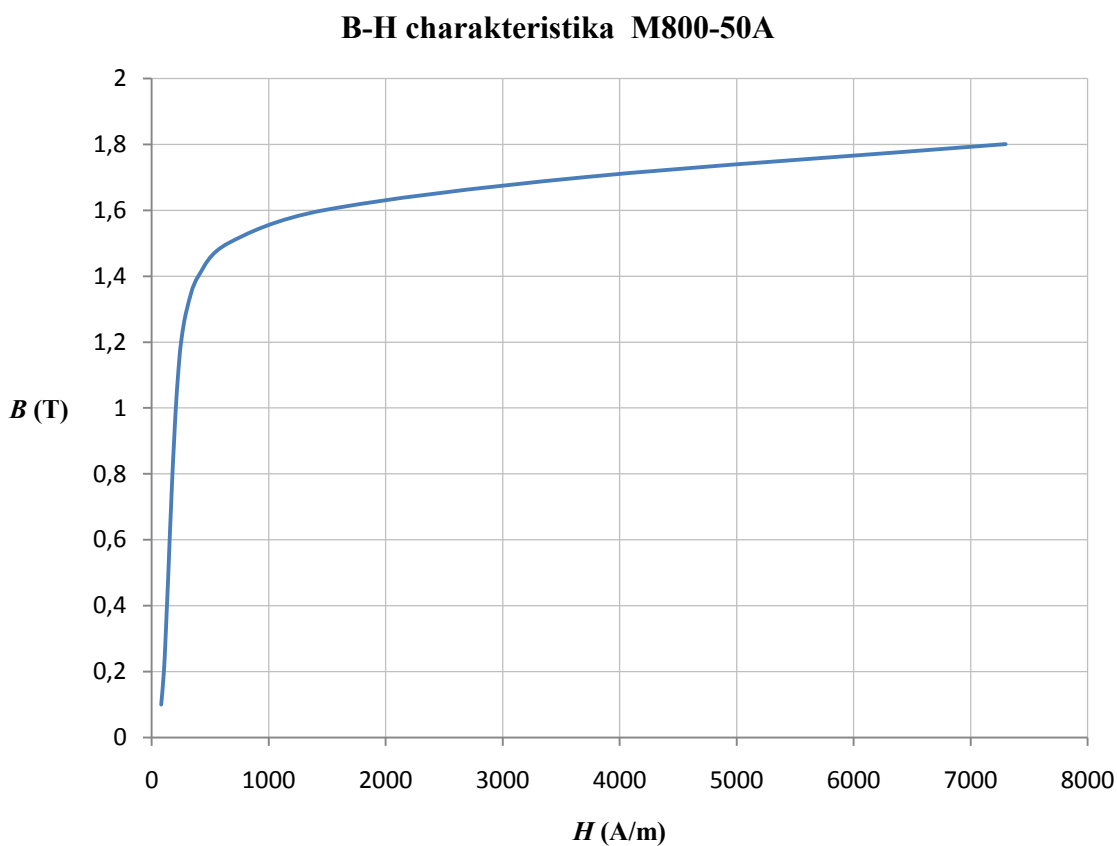


Obr. 26 B-H charakteristika plechu M350-50A

Rotor:

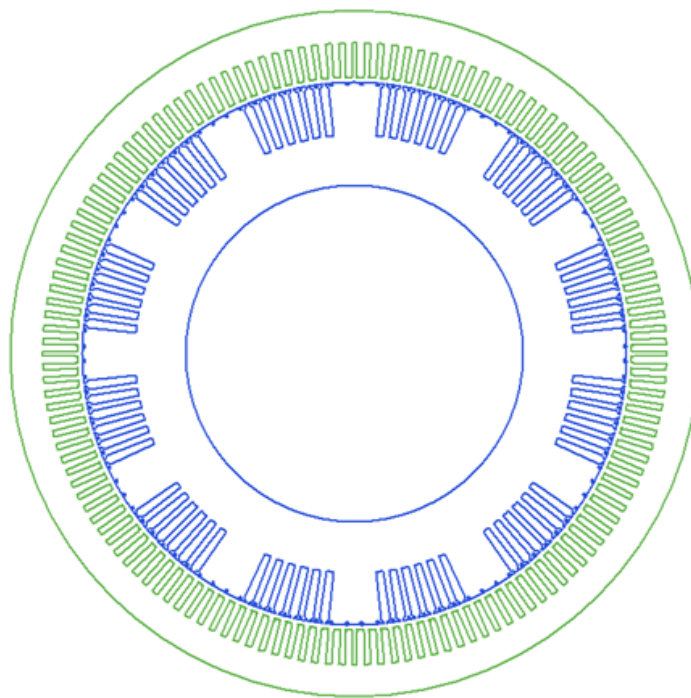
Rotorový svazek je složen stejně jako svazek statorový ze 14 paketů tloušťky 80 mm. Mezi jednotlivými pakety je výztuhami vytvořeno 13 radiálních ventilačních kanálů o tloušťce 10 mm. Celková délka rotorového svazku je tedy také $14 \times 80 + 13 \times 10 = 1250$ mm.

Plechý rotoru jsou vyrobeny z plechu určeného pro elektrotechniku, konkrétně z materiálu M800-50A, jehož B-H charakteristika je znázorněna v níže uvedeném grafu.

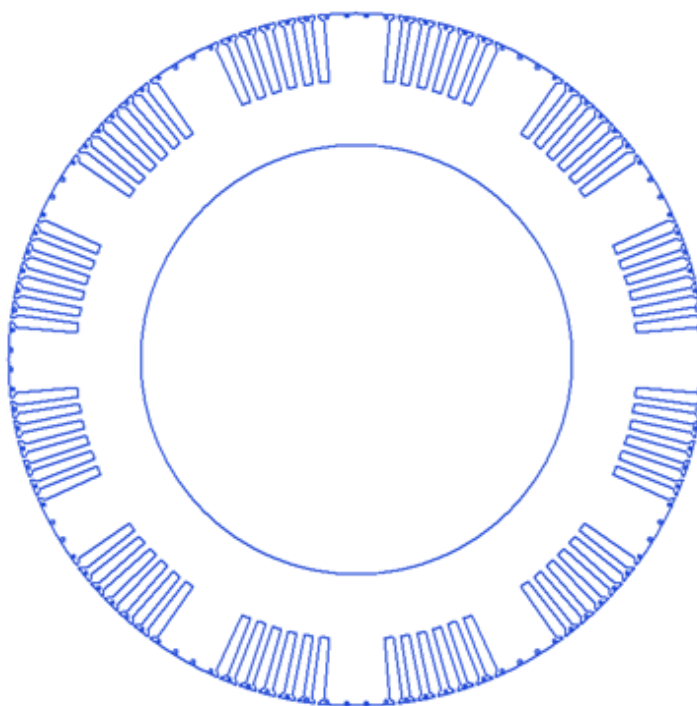


Obr. 27 B-H charakteristika plechu M800-50A

Geometrický model statoru a rotoru:



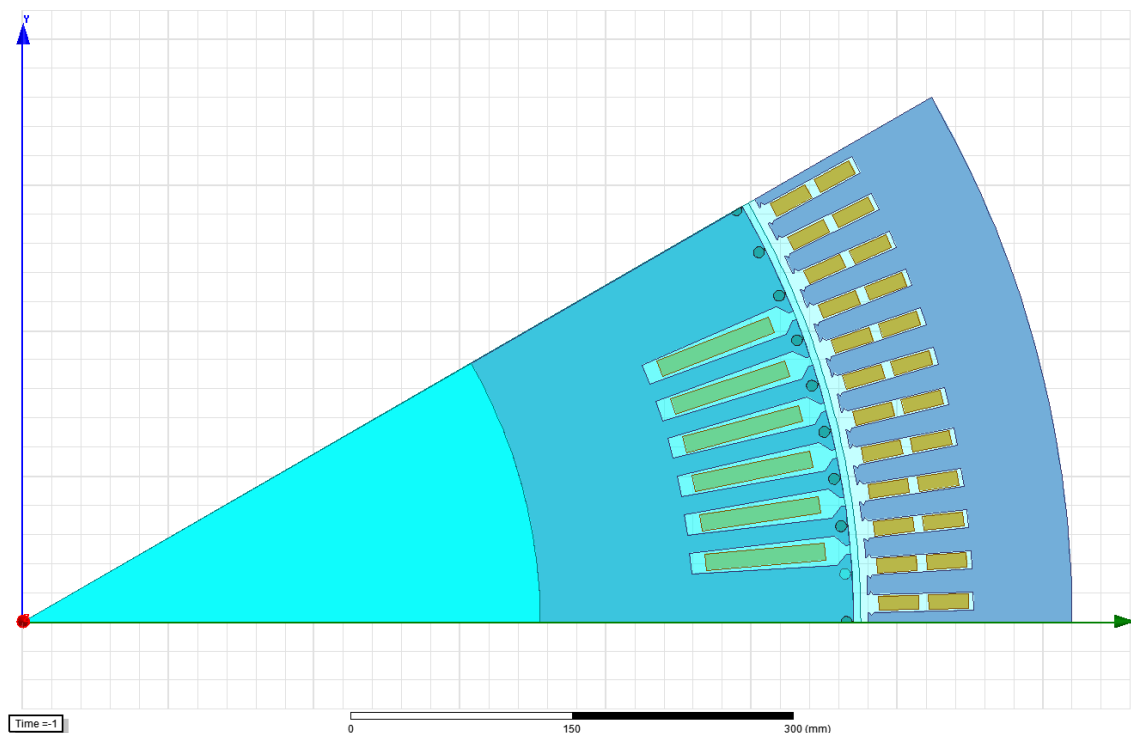
Obr. 28 Geometrie statorového a rotorového plechu



Obr. 29 Geometrie rotorového plechu

2D model synchronního generátoru:

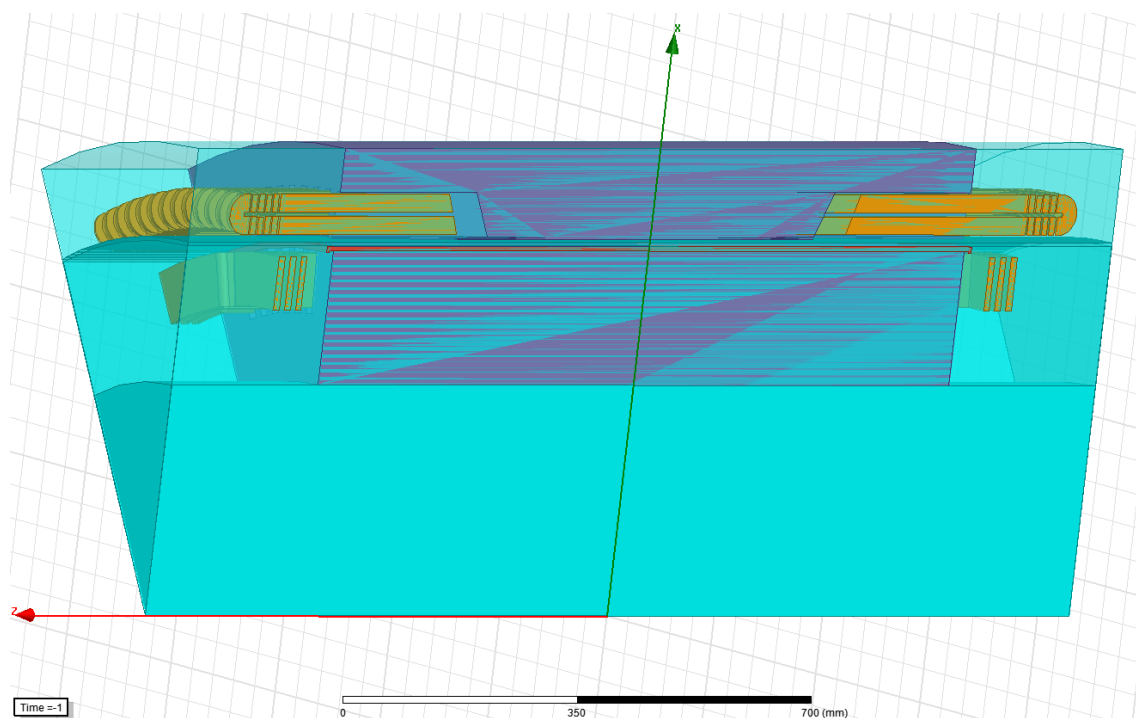
Z důvodu symetričnosti a usnadnění numerických výpočtů došlo programem ANSYS Maxwell ke zjednodušení celkového 2D modelu na jednu dvanáctinu.



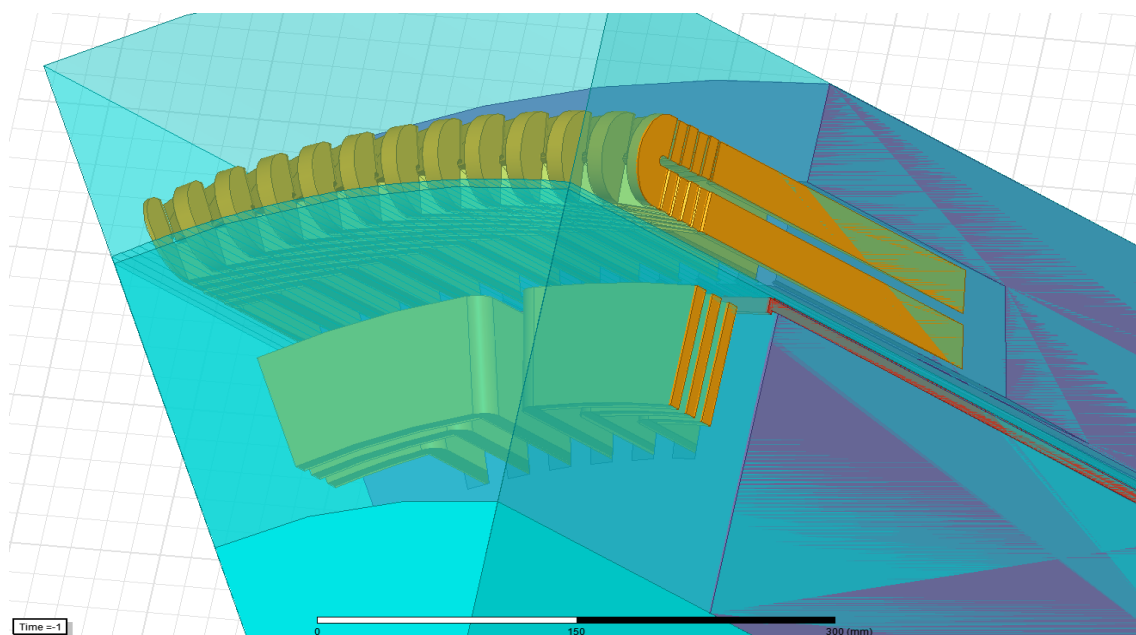
Obr. 30 2D model navrhovaného synchronního generátoru

3D model synchronního generátoru:

Také model 3D je pro usnadnění numerických výpočtů zjednodušen a využívá se pouze jedna dvanáctina celkového modelu synchronního generátoru s hladkým rotorem. Na níže uvedených obrázcích je vidět nasíťovaná výseč modelu navrhovaného generátoru.



Obr. 31 Model navrhovaného synchronního generátoru



Obr. 32 3D model - detail uložení cívek

Model 3D znázorňuje jednotlivé části navrhovaného synchronního generátoru. Velmi krásně je zde znázorněno uložení statorového a rotorového vinutí (žlutou barvou) a také tlumícího vinutí (červenou barvou).

3D model navrhovaného synchronního generátoru vytvořený programem ANSYS Maxwell není podobou zcela věrný skutečnému stroji.

2D a 3D model využívá k výpočtům a vyhodnocení požadovaných parametrů nejpřesnější metody konečných prvků. Tzv. konečno-prvkový model pak umožní například simulaci charakteristiky nakrátko a naprázdno.

5.1 Návrh pomocí programu ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell patří mezi špičku nejlepších simulačních softwarů elektromagnetického pole pro inženýry, jejichž úkolem je navrhovat a analyzovat 2D a 3D elektromagnetické a elektromechanické zařízení jako jsou motory, generátory, pohony, transformátory, různé spínací a jističí přístroje a další. ANSYS Maxwell používá nejpřesnější metody konečných prvků pro řešení frekvenční, statické oblasti, časově proměnného elektrického a elektromagnetického pole. Mezi výhody programu ANSYS Maxwell patří bezesporu jeho automatizovaný proces řešení, kdy je zapotřebí zadat pouze geometrické rozměry, vlastnosti materiálů a další požadavky. Další předností je schopnost generovat vysokou věrnost a přesnost.

Modul ANSYS RMxpert s Maxwell tvoří velmi kvalitní návrhový nástroj. RMxpert v sobě skrývá vlastní konstrukce stojů, jejich geometrie, materiály a okrajové podmínky pro vyhodnocení elektromagnetických přechodných jevů. RMxpert dokáže rychle a snadno po nastavení požadovaných parametrů vyhodnotit kritické údaje a grafy jako je například točivý moment v závislosti na rychlosti. RMxpert umožňuje jednodušší návrh daného stroje.

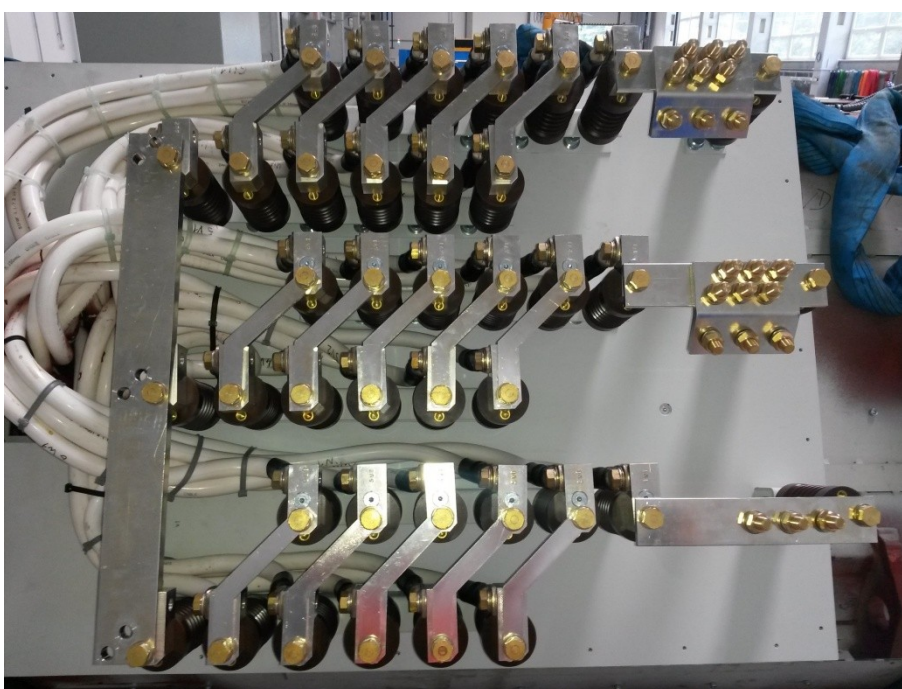
Nástroj RMxpert nabízí celou řadu šablon jako například:

- Indukční stroje
- Jedno fázové motory
- Třífázové motory
- Synchronní stroje
- Synchronní generátory / motory s hladkým rotorem
- Synchronní generátory / motory s vyniklými póly
- Stejnoseměrné generátory / motory
- a další

Samotný proces návrhu spočívá v určení tvaru a rozměrů statorových a rotorových drážek, parametrů cívek, drátů a izolací, druhu vinutí, počtu paralelních drátů, rozměrech statorových a rotorových svazků a určení dalších potřebných parametrů stroje. Dále je zapotřebí nastavení požadavků analýzy. Nástroj RMxpert také automaticky generuje model ve 2D nebo 3D geometrii. Výsledkem je pak kompletní výpočet navrhovaného stroje. K dispozici jsou kompletní výsledky analytického výpočtu.

5.1.1 Varianta zapojení do hvězdy - Y 6600 V

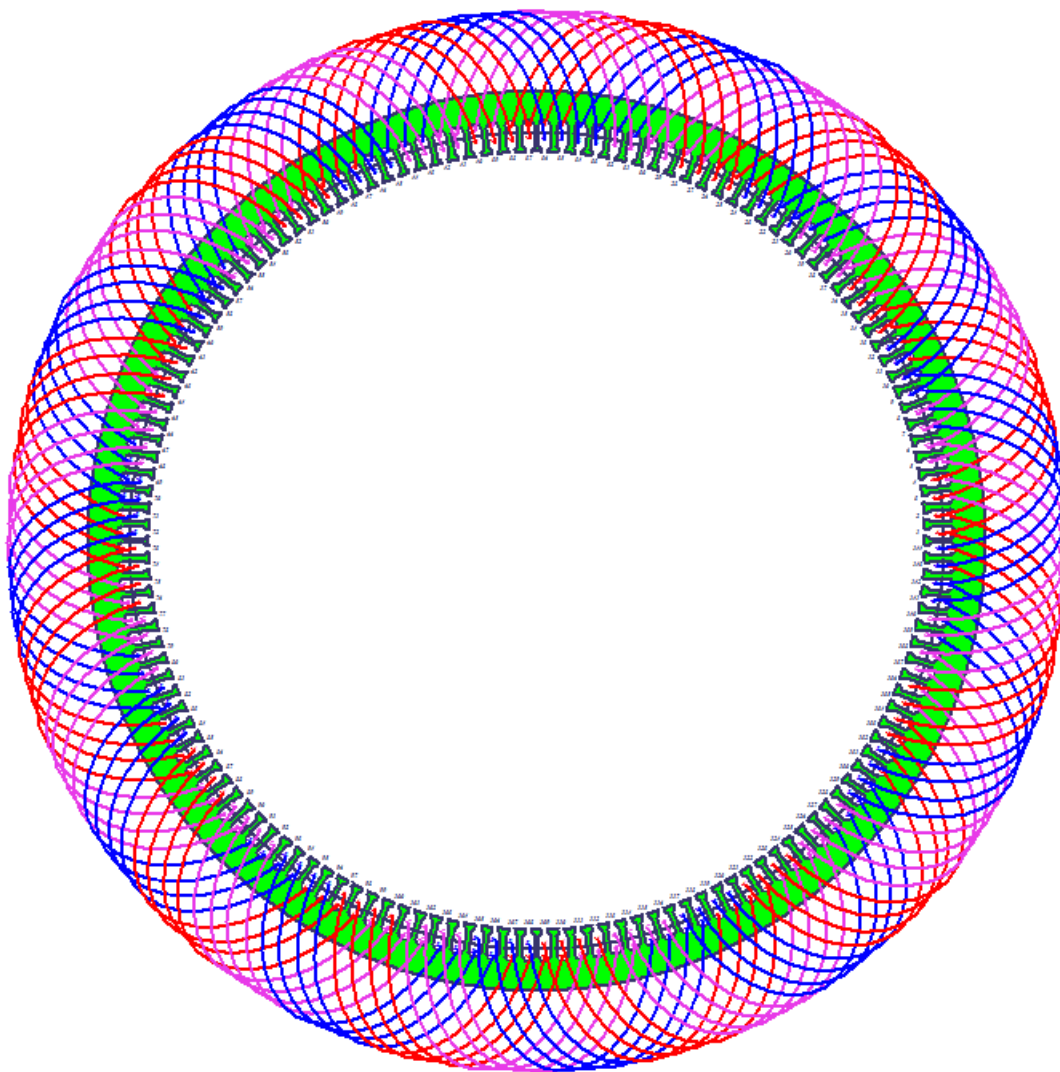
- zapojení do Y
- zdánlivý výkon $S_N = 4000 \text{ kVA}$
- jmenovité napětí $U_N = 6,6 \text{ kV}$
- jmenovitý proud $I_N = 350 \text{ A}$



Obr. 33 Svorkovnice při zapojení do Y

Na obrázku je vyobrazeno zapojení svorkovnice, na níž je možno vhodným propojením skupin cívek vinutí vytvořit požadované zapojení. Vyobrazené zapojení představuje variantu zapojení do Y s jmenovitým výstupním napětím $U_N = 6600 \text{ V}$ a jmenovitým proudem $I_N = 350 \text{ A}$.

V programu ANSYS Maxwell bylo požadovaného zapojení dosaženo správným nastavením paralelních větví ve statorovém vinutí. Statorové vinutí pro zapojení varianty do Y s jmenovitým výstupním napětím 6600 V má zapojeny dvě paralelní větve.



Obr. 34 Zapojení statorového vinutí

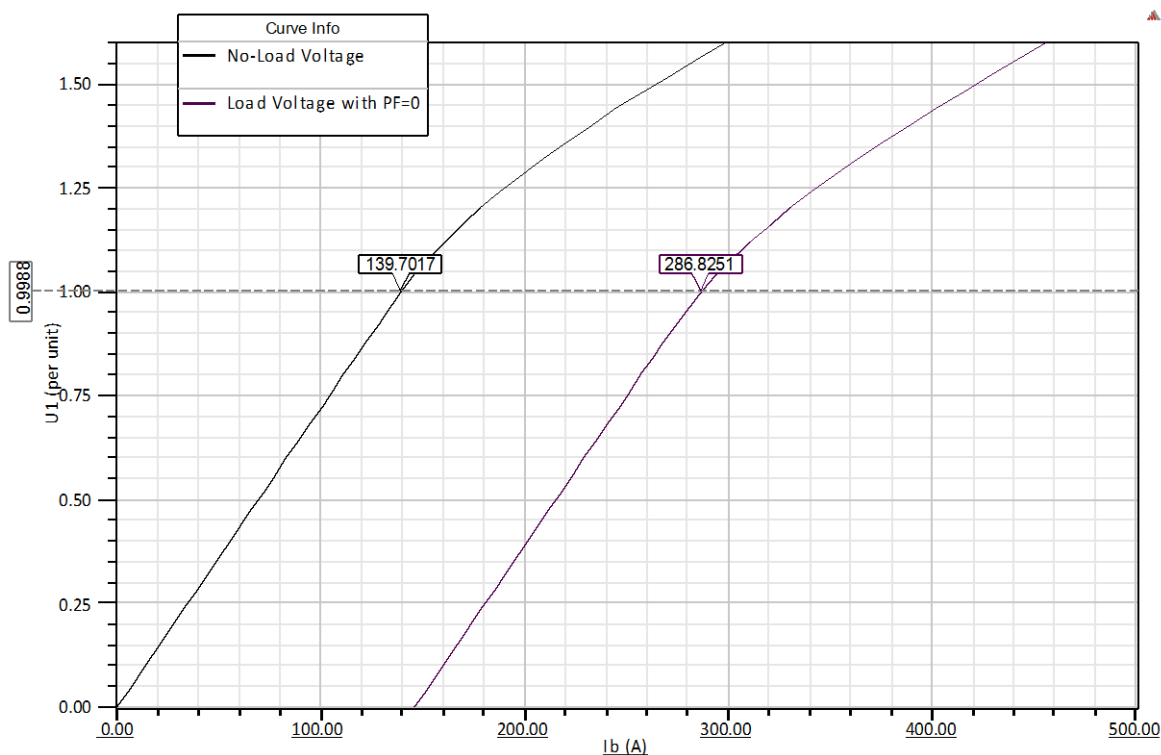
Vypočítané hodnoty pomocí programu ANSYS Maxwell pro zapojení Y 6600 V:

- fázové napětí $U_f = 3810,4$ V
- fázový proud $I_f = 349,92$ A
- budící proud $I_{b0} = 139,88$ A
- činitel plnění drážky statoru $k_{SCu} = 86,9$ %
- činitel plnění drážky rotoru $k_{RCu} = 87,3$ %
- zkratový poměr $i_k = 0,958$
- odpor vinutí statoru $R_f = 0,0751$ Ω
- odpor vinutí rotoru $R_{rot} = 0,528$ Ω
- reaktance kotvy $X_f = 0,621$ Ω

- indukce v zubu statoru při stavu naprázdno $B_{Sz} = 1,44$ T
- indukce v zubu rotoru při stavu naprázdno $B_{Rz} = 0,866$ T
- indukce ve vzduchové mezeře při stavu naprázdno $B_{\delta} = 0,751$ T
- ztráty v mědi $\Delta P_{Cu} = 70,394$ kW
- ztráty v železe $\Delta P_{Fe} = 21,28$ kW
- mechanické ztráty $\Delta P_{Mech} = 5$ kW
- celkové ztráty $\Delta P_{Celk} = 111,16$ kW
- účinnost $\eta = 97$ %
- účinník (PF) $\cos\varphi = 0,899$

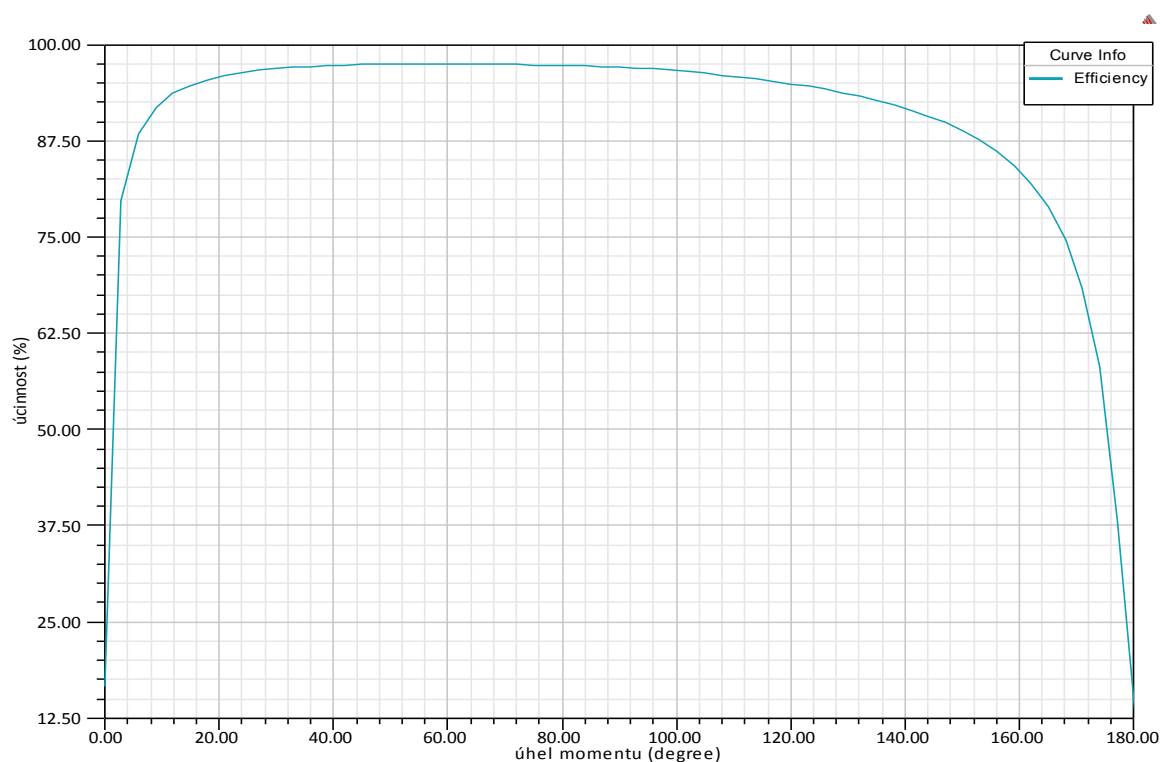
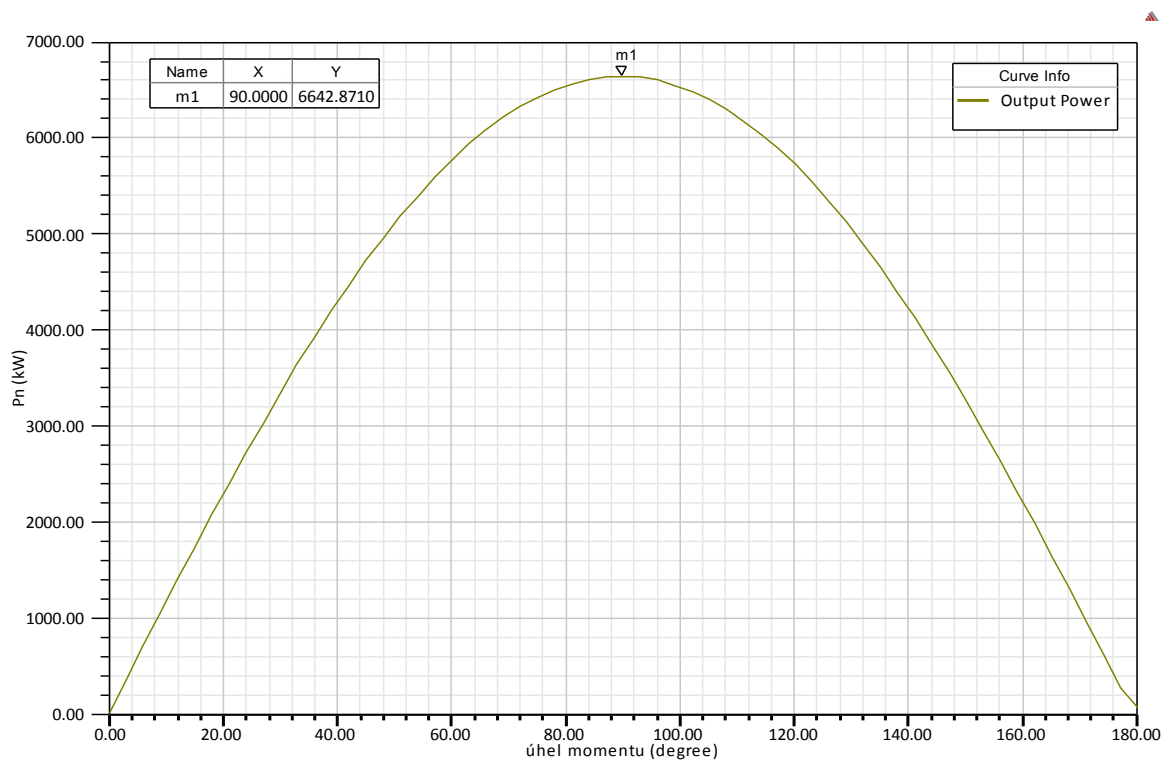
Veškeré vypočítané hodnoty pro variantu zapojení Y 6600 V jsou uvedeny v příloze.

Výsledné graf:

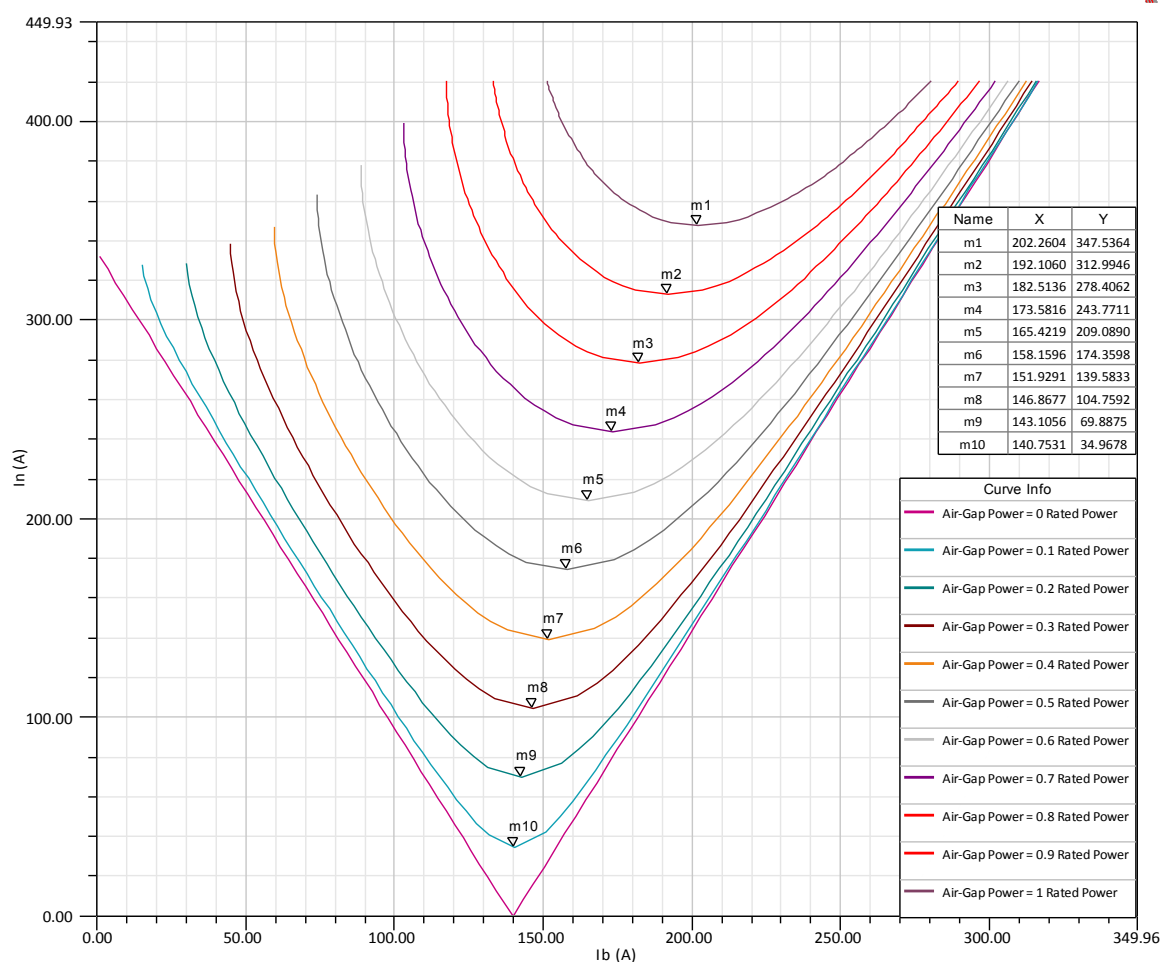


Obr. 35 Indukční charakteristika - varianta zapojení Y 6600 V

Z uvedené charakteristiky je zřejmé, že hodnota budícího proudu I_{bo} se shoduje s uvedenou štítkovou hodnotou. $I_{bo} = 139,7$ A. Také hodnota jmenovitého budícího proudu I_b se téměř shoduje s uvedenou štítkovou hodnotou. Rozdíl mezi štítkovou hodnotou a vypočtenou hodnotou je 1,3 %.

Obr. 36 Závislost účinnosti η na úhlu momentu - varianta zapojení Y 6600 VObr. 37 Závislost výstupního výkonu P_N na úhlu momentu - varianta zapojení Y 6600 V

Z výše uvedených grafů vyplývá, že maximální účinnosti η a maximálního výstupního výkonu P_N je dosaženo tehdy, je-li úhel momentu roven hodnotě 90° .



Obr. 38 V-křivky - varianta zapojení Y 6600 V

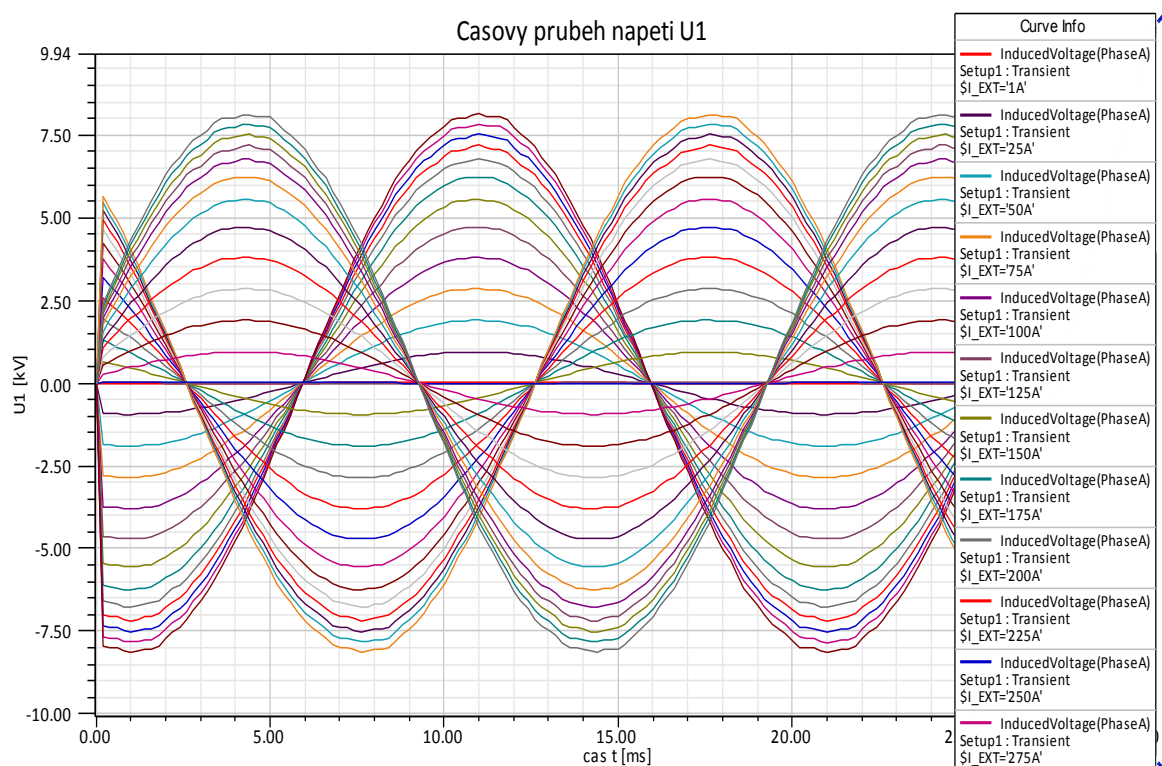
Synchronní generátor bude pracovat v podbuzeném stavu. Vynesené V-křivky představují závislost statorového proudu na proudu budícím při konstantním činném výkonu přířazovaného stroje.

Charakteristika naprázdno:

Synchronní generátor pracuje naprázdno tehdy, jestliže není odebírán žádný výkon. Proud dodávaný do sítě je tedy roven nule.

Při výpočtu charakteristiky naprázdno pomocí programu ANSYS Maxwell byl postupně nastavován budicí proud I_b od hodnoty $I_b = 25$ A až po hodnotu $I_b = 300$ A s krokem 25 A. Byla také nastavena počáteční hodnota $I_b = 1$ A.

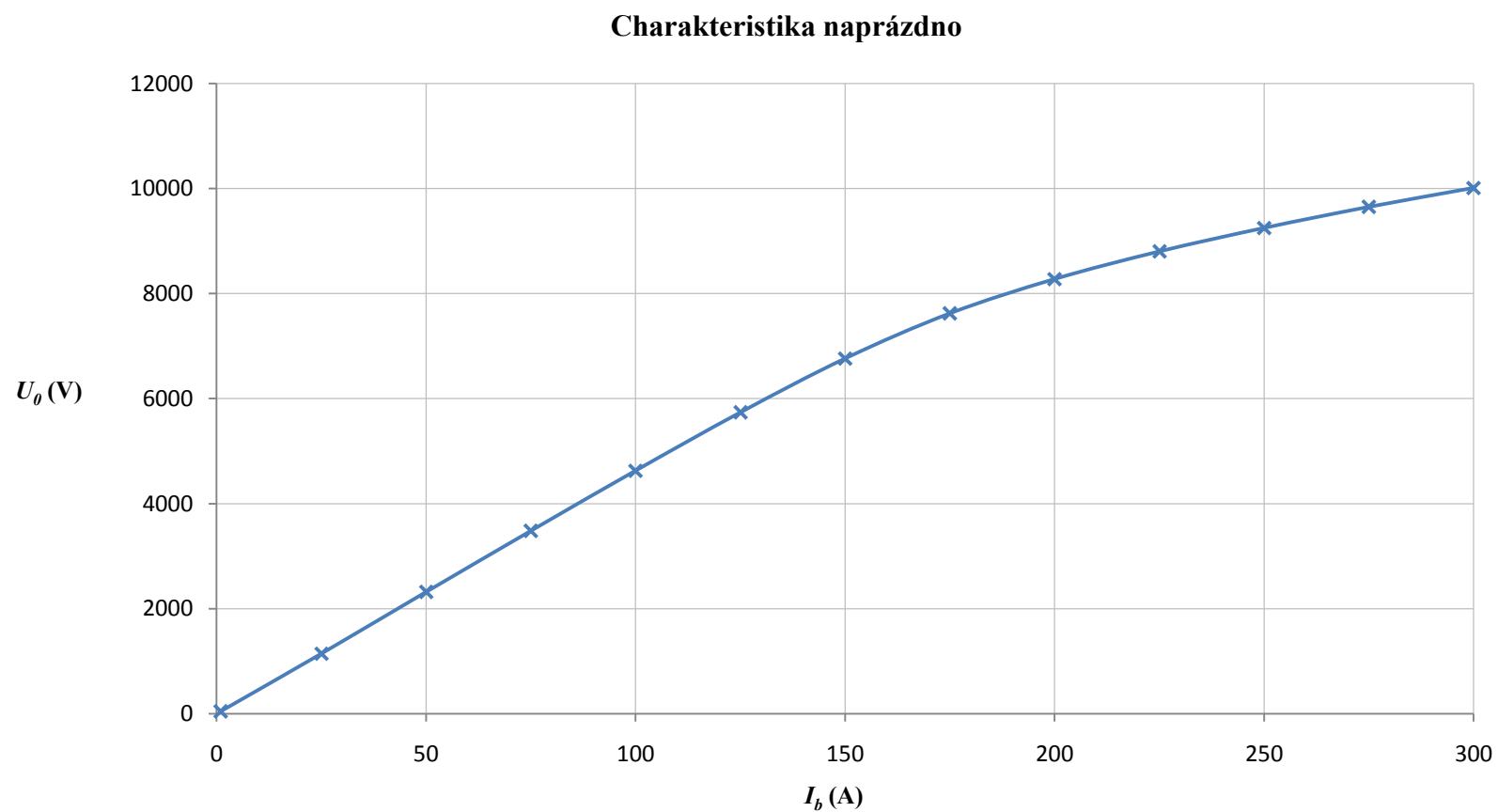
Pro určení charakteristiky naprázdno pomocí programu ANSYS Maxwell bylo zapotřebí postupovat tak, že v každé fázi statorového vinutí byla nastavena hodnota napětí rovna 0 V. Odpor statorového vinutí byl nastaven na hodnotu řádově $10^6 \Omega$. Poté došlo k postupnému zvyšování budicího proudu. Jelikož byly výsledné hodnoty napětí U_0 fázové, bylo zapotřebí pro další zpracování fázové hodnoty přepočítat na hodnoty sdružené a to vynásobením $\sqrt{3}$.



Obr. 39 Časový průběh fázového napětí U_1 - varianta zapojení Y 6600 V

I_b (A)	U_o (V)
1	45,03
25	1146,62
50	2317,48
75	3481,42
100	4629,77
125	5740,02
150	6767,12
175	7622,76
200	8279,20
225	8805,75
250	9254,35
275	9652,72
300	10016,45

Tab. 5 Tabulka hodnot charakteristiky naprázdno - varianta zapojení Y 6600 V



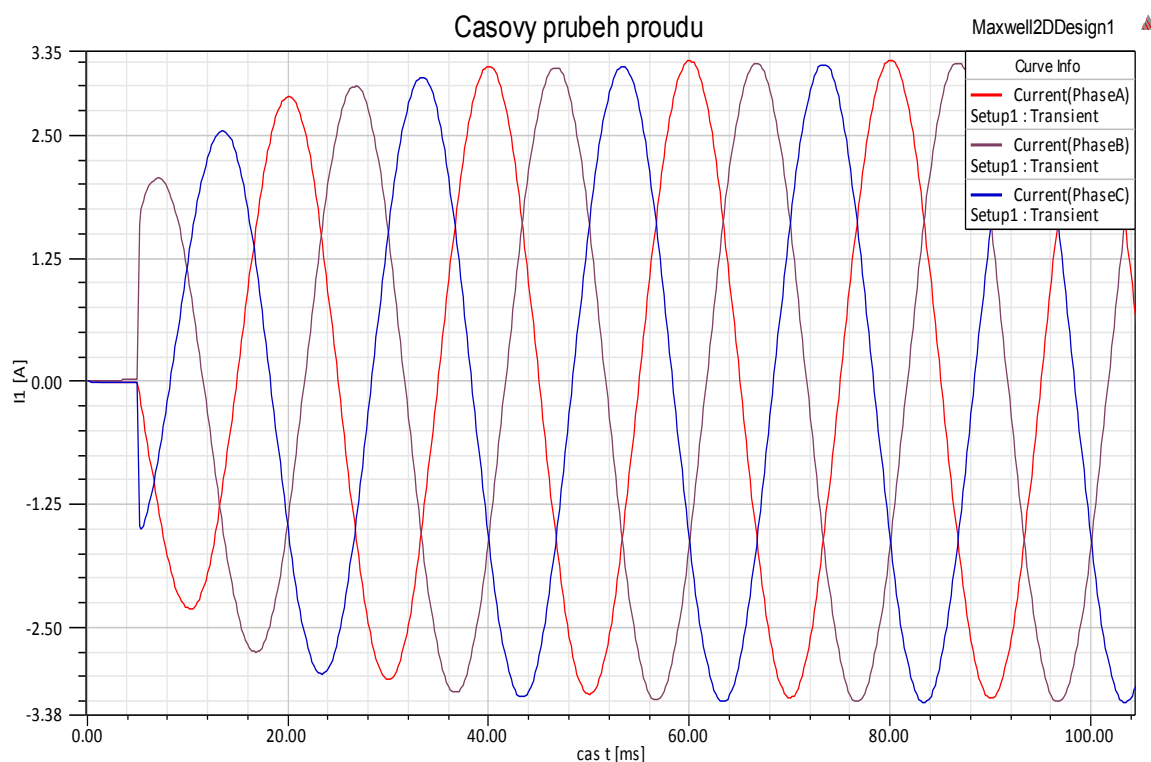
Obr. 40 Charakteristika naprázdno - varianta zapojení Y 6600 V

Charakteristika nakrátko:

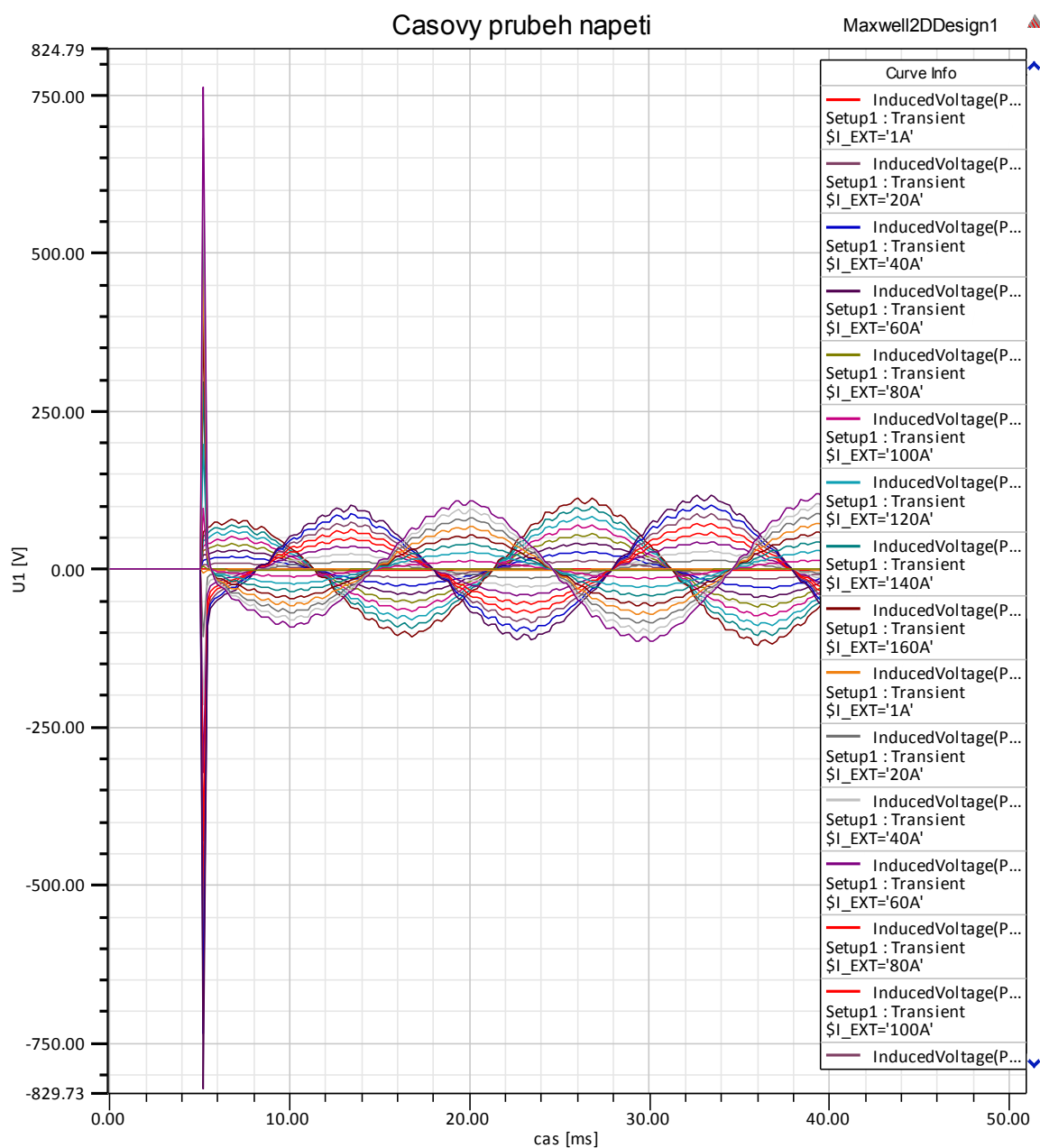
Při měření charakteristiky nakrátko synchronní stroj pracuje jako generátor a jeho svorky jsou spojeny nakrátko.

Při měření charakteristiky nakrátko pomocí programu ANSYS Maxwell byl postupně nastavován budící proud I_b od hodnoty $I_b = 20$ A až po hodnotu $I_b = 160$ A s krokem 20 A. Byla také nastavena počáteční hodnota $I_b = 1$ A.

Při simulaci měření charakteristiky nakrátko byl nasimulován trojfázový zkrat. Napětí ve fázích bylo nastaveno na hodnotu 0 V. V čase $t < 5$ ms byl synchronní generátor buzen budícím proudem $I_b = 0,001$ A. Poté byl budící proud navyšován.



Obr. 41 Časový průběh proudu I_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení Y 6600 V

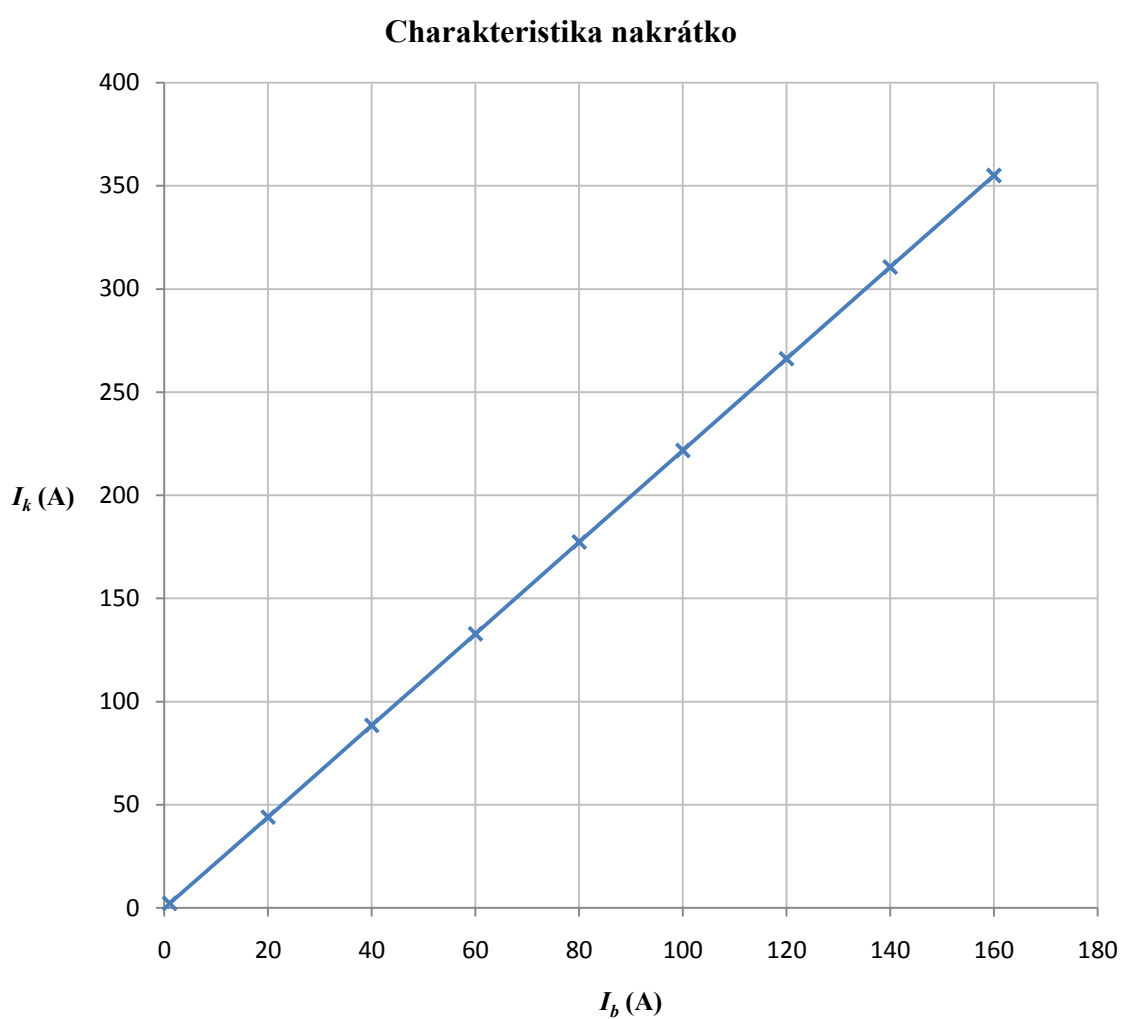


Obr. 42 Časový průběh napětí U_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení Y 6600 V

Z uvedených grafů je patrné, že v čase $t = 5$ ms nastane trojfázový zkrat. Přibližně v čase $t = 30$ ms dojde k jeho ustálení.

I_k (A)	I_b (A)
2,2	1
44	20
88,5	40
132,8	60
177,3	80
221,7	100
266,1	120
310,55	140
354,9	160

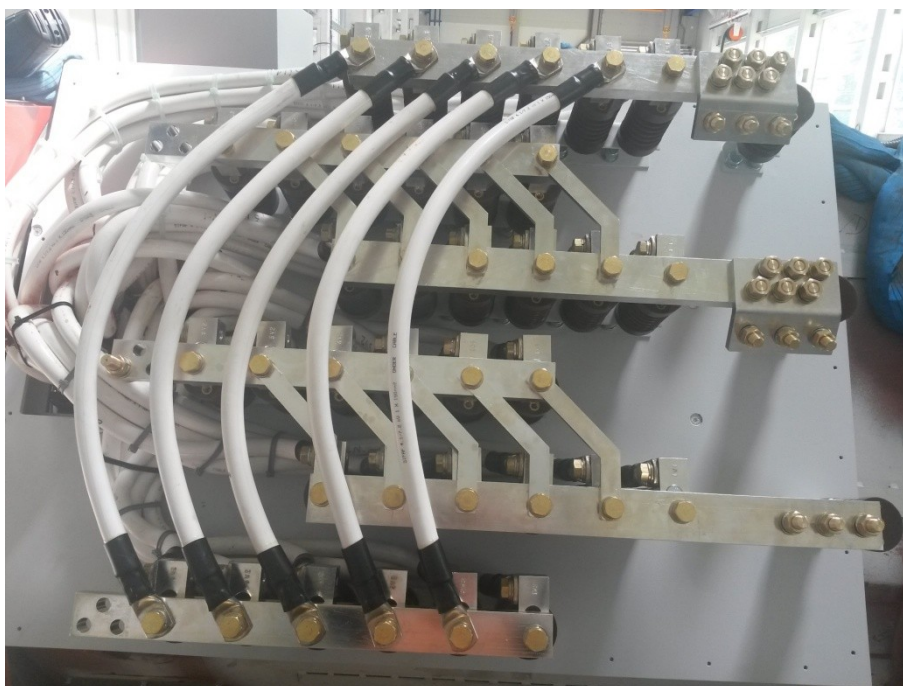
Tab. 6 Tabulka hodnot charakteristiky nakrátko - varianta zapojení Y 6600 V



Obr. 43 Charakteristika nakrátko - varianta zapojení Y 6600 V

5.1.2 Varianta zapojení do trojúhelníku - D 690 V

- zapojení do D
- zdánlivý výkon $S_N = 4000 \text{ kVA}$
- jmenovité napětí $U_N = 690 \text{ V}$
- jmenovitý proud $I_N = 3347 \text{ A}$



Obr. 44 Svorkovnice při zapojení do D

Na výše uvedeném obrázku je vyobrazeno zapojení svorkovnice navrhovaného synchronního generátoru do trojúhelníku D s jmenovitým napětím $U_N = 690 \text{ V}$ a jmenovitým proudem $I_N = 3347 \text{ A}$.

V programu ANSYS Maxwell bylo požadovaného zapojení dosaženo správným nastavením paralelních větví ve statorovém vinutí a nastavení zapojení stroje do D. Statorové vinutí pro zapojení do D s jmenovitým výstupním napětím 690 V má zapojeno dvanáct paralelních větví.

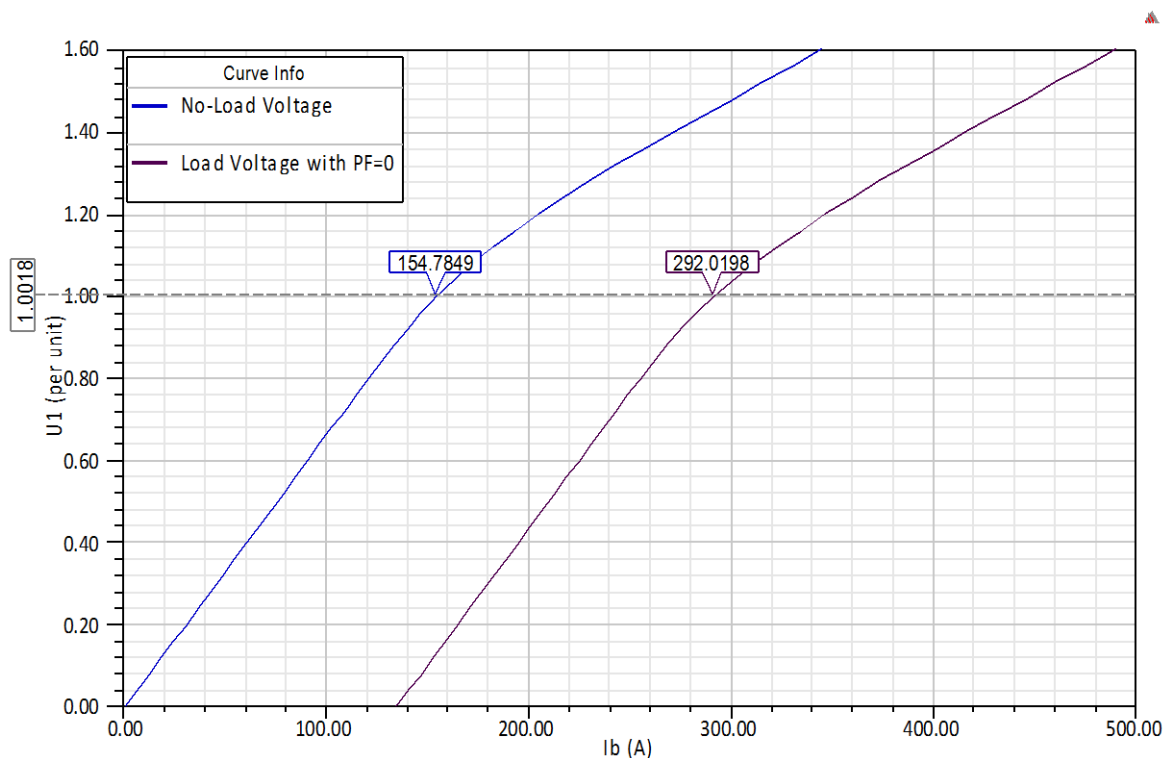
Vypočítané hodnoty pomocí programu ANSYS Maxwell pro zapojení D 690 V:

- fázové napětí $U_f = 690 \text{ V}$
- fázový proud $I_{lf} = 1932,37 \text{ A}$
- budící proud $I_{b0} = 154,4 \text{ A}$
- činitel plnění drážky statoru $k_{SCu} = 86,9 \%$

- činitel plnění drážky rotoru $k_{RCu} = 87,3 \%$
- zkratový poměr $i_k = 1,1498$
- odpor vinutí statoru $R_l = 0,00208 \Omega$
- odpor vinutí rotoru $R_{rot} = 0,642 \Omega$
- reaktance kotvy $X_l = 0,0171 \Omega$
- indukce v zubu statoru při stavu naprázdno $B_{Sz} = 1,56 \text{ T}$
- indukce v zubu rotoru při stavu naprázdno $B_{Rz} = 0,941 \text{ T}$
- indukce ve vzduchové mezeře při stavu naprázdno $B_\delta = 0,816 \text{ T}$
- ztráty v mědi $\Delta P_{Cu} = 67,39 \text{ kW}$
- ztráty v železe $\Delta P_{Fe} = 24,64 \text{ kW}$
- mechanické ztráty $\Delta P_{Mech} = 5 \text{ kW}$
- celkové ztráty $\Delta P_{Celk} = 110,63 \text{ kW}$
- účinnost $\eta = 97 \%$
- účinník (PF) $\cos\varphi = 0,899$

Veškeré vypočítané hodnoty pro variantu zapojení D 690 V jsou uvedeny v příloze.

Výsledné graf:



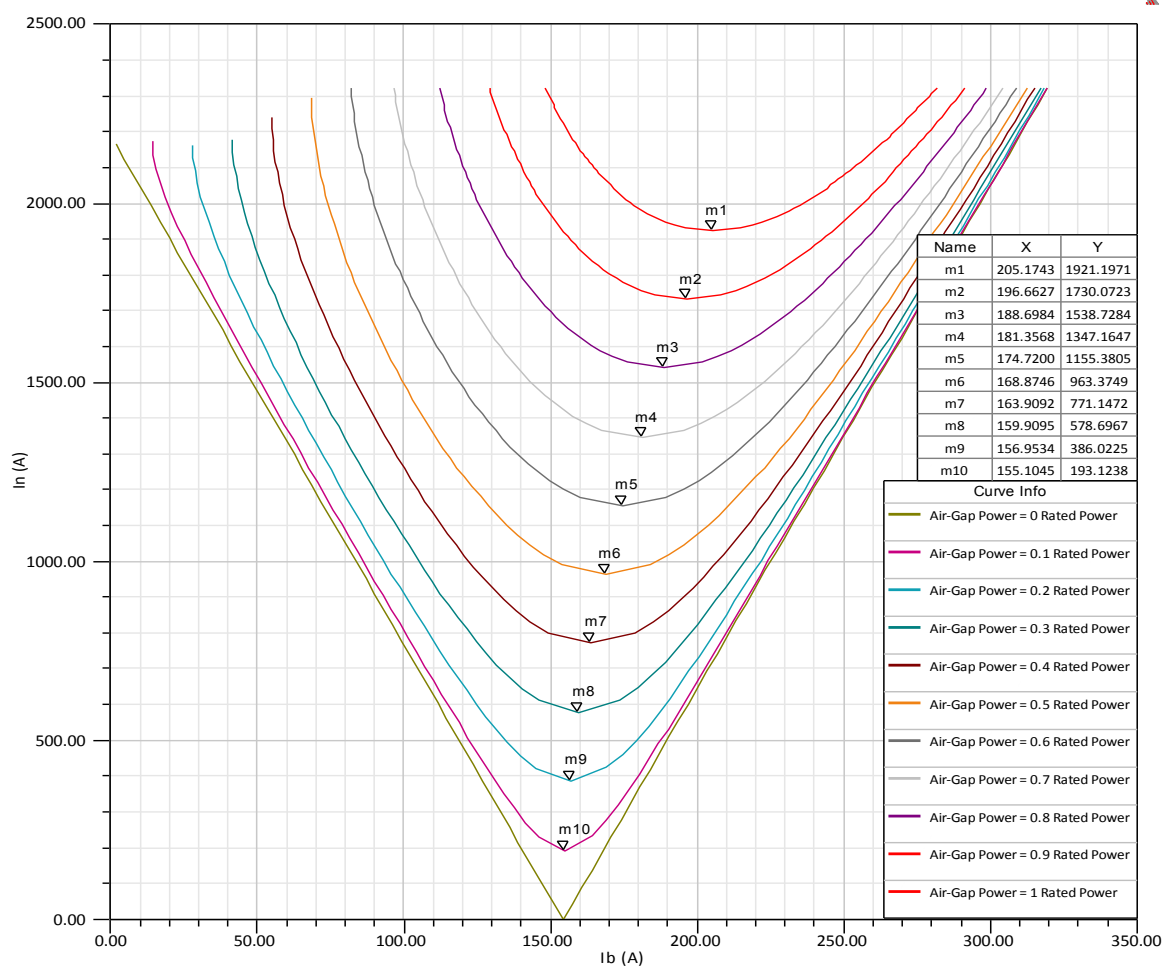
Obr. 45 Indukční charakteristika - varianta zapojení D 690 V

Při provedení prostého přepočtu při přepojení cívek vyjde požadované napětí 635 V. Požadavek konstruktéra byl však 690 V a stroj bude nutno pro dosažení požadovaných hodnot přibudít. Jedná se o speciální stroj umožňující zapojení jak do hvězdy, tak i do trojúhelníka s rozdílným svorkovým napětím.

$$U_{ND} = \frac{U_{NY}}{\sqrt{3}} = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 635,08V \quad (5.1)$$

kde U_{ND} jmenovité napětí při zapojení do trojúhelníka (V)

U_{NY} jmenovité napětí při zapojení do hvězdy (V)



Obr. 46 V-křivky - varianta zapojení D 690 V

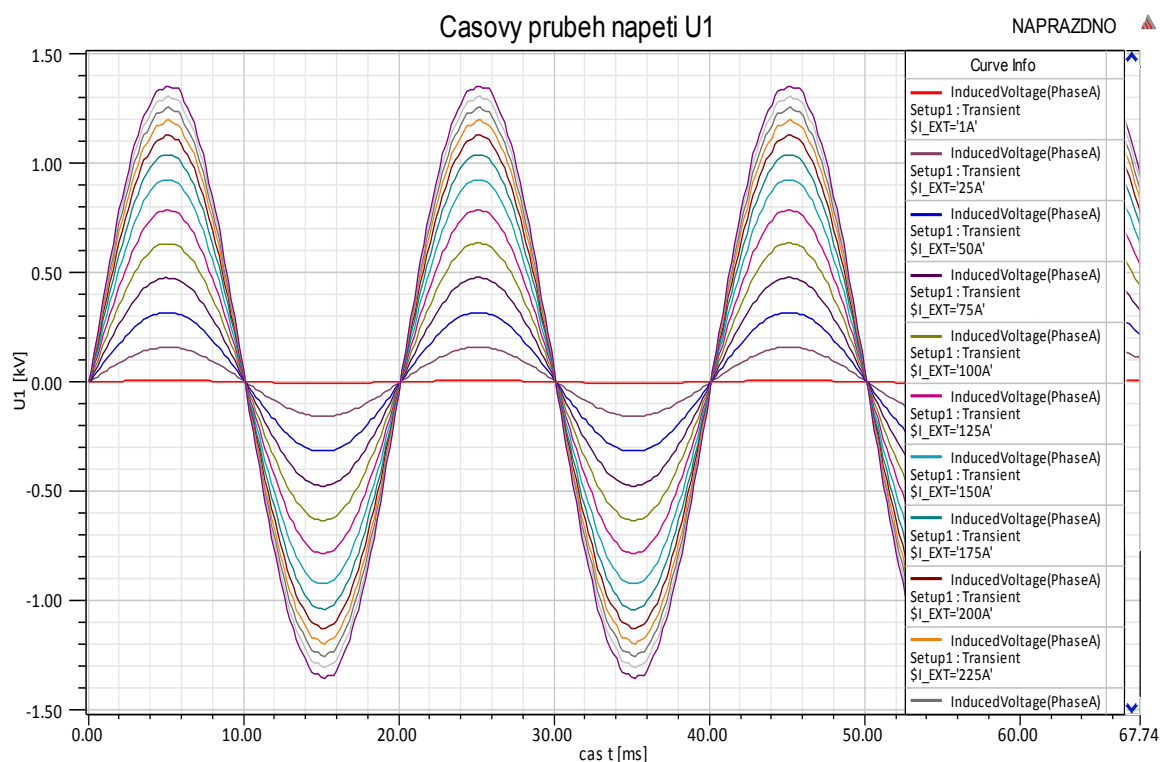
Vynesené V-křivky představují závislost statorového proudu na proudu budícím při konstantním činném výkonu přířazovaného stroje.

Pomyslně vynesená křivka protínající body m1 až m10 by nám udávala hodnotu $\cos\varphi = 1$. Jelikož bude synchronní generátor pracovat v podbuzeném stavu, bude stroj pracovat s hodnotami budícího proudu nalevo od pomyslné křivky $\cos\varphi = 1$.

Charakteristika naprázdno:

Při měření charakteristiky naprázdno pomocí programu ANSYS Maxwell byl postupně nastavován budící proud I_b od hodnoty $I_b = 25$ A až po hodnotu $I_b = 300$ A s krokem 25 A. Byla také nastavena počáteční hodnota $I_b = 1$ A.

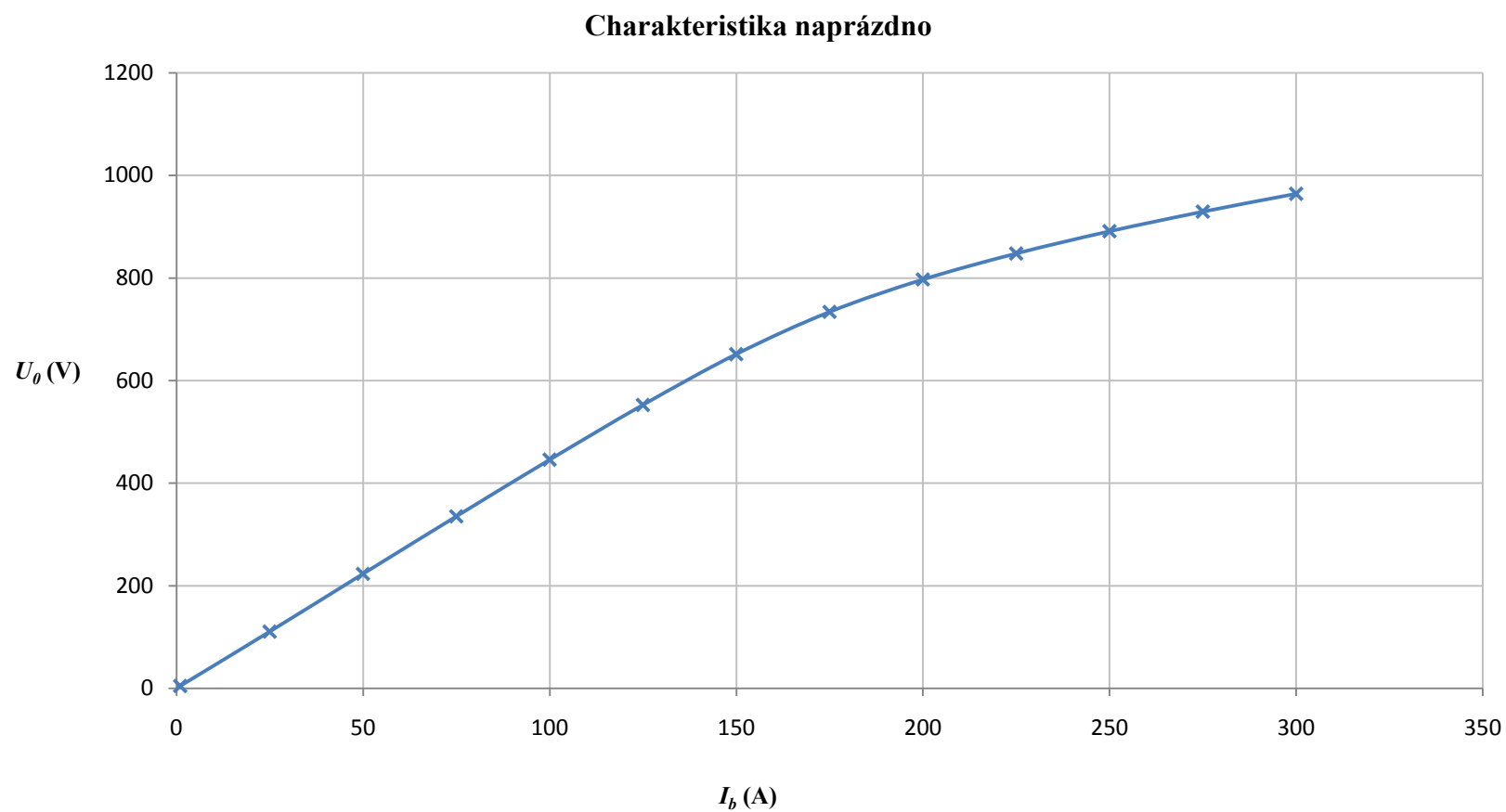
Určení charakteristiky naprázdno pomocí programu ANSYS Maxwell probíhalo tak, že pro každou fázi statorového vinutí byla nastavena hodnota napětí rovna 0 V. Odpor statorového vinutí byl nastaven na hodnotu řádově $10^6 \Omega$. Po nastavení všech požadavků byl stroj rozběhnut a postupně byl zvyšován budící proud I_b . Při zapojení stroje do hvězdy bylo zapotřebí výsledné hodnoty napětí přepočítat na hodnoty sdružené. Při zapojení do trojúhelníka se hodnoty fázového a sdruženého napětí shodují, tudíž není zapotřebí žádný přepočet.



Obr. 47 Časový průběh napětí U_1 - varianta zapojení D 690 V

I_b (A)	U_0 (V)
1	4,34
25	110,44
50	223,05
75	335,09
100	445,52
125	552,44
150	651,34
175	733,75
200	796,88
225	847,56
250	890,84
275	929,12
300	964,07

Tab. 7 Tabulka hodnot charakteristiky naprázdno - varianta zapojení Y - 690 V

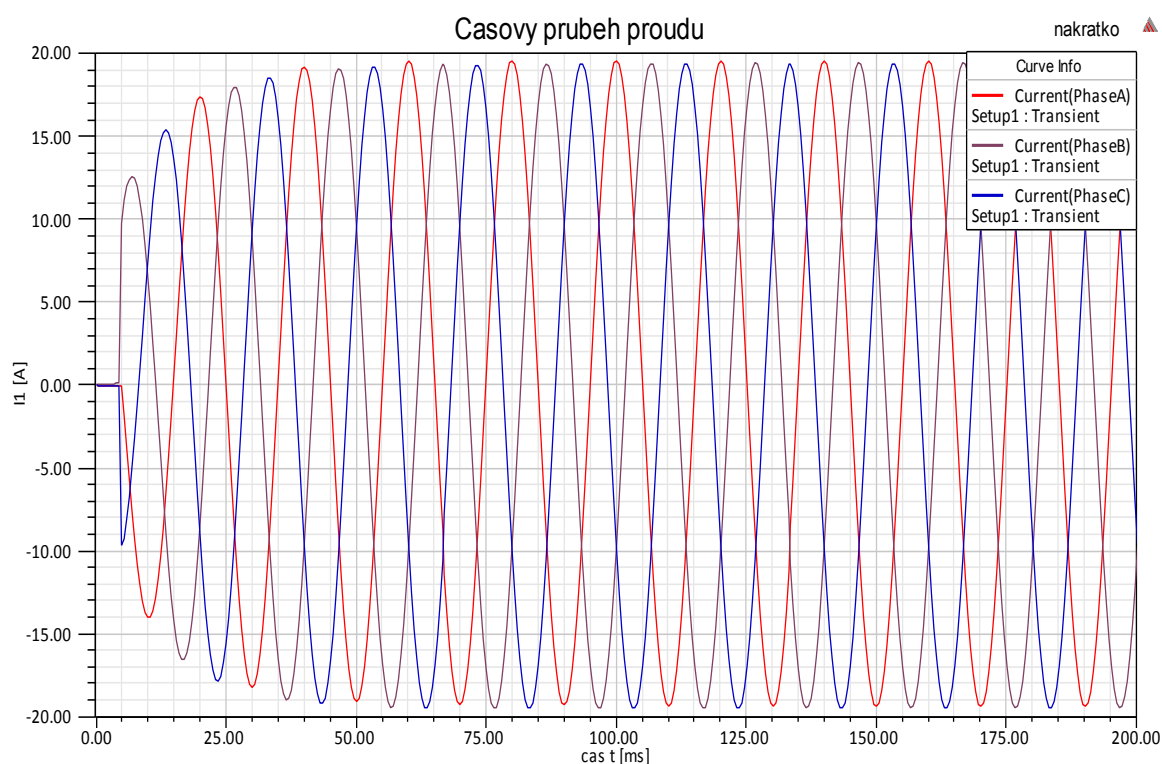


Obr. 48 Charakteristika naprázdno - varianta zapojení D 690 V

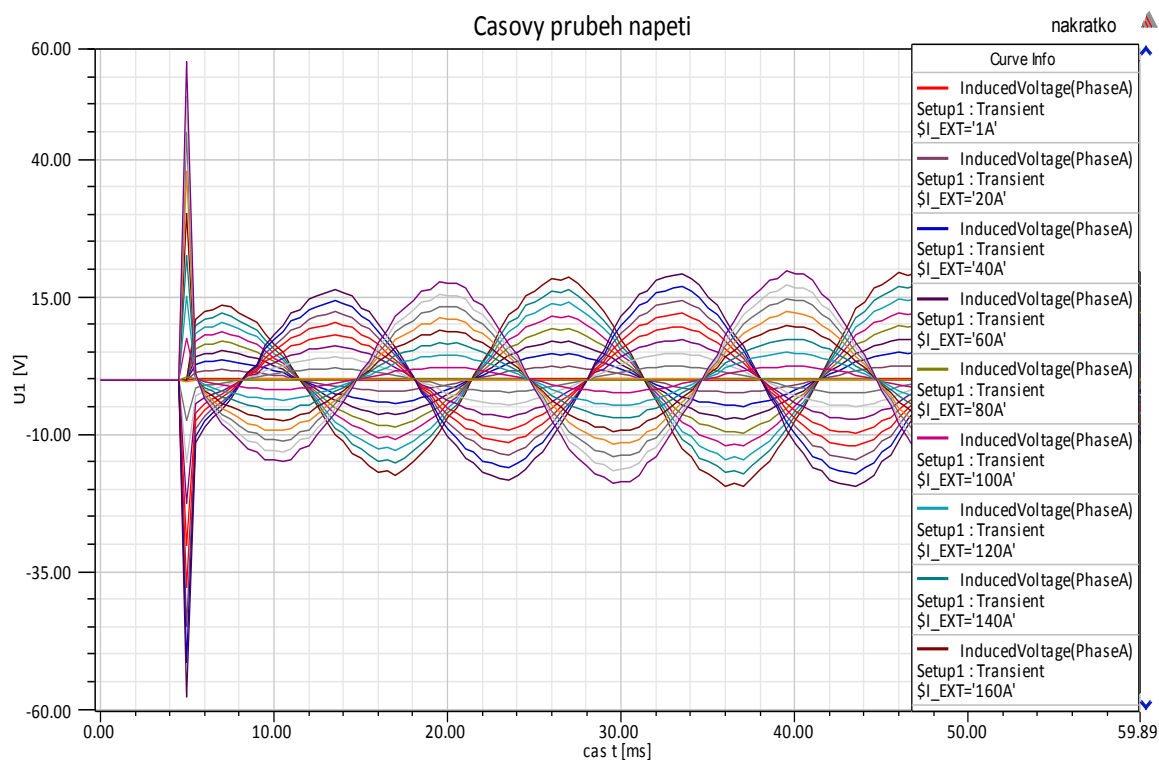
Charakteristika nakrátko:

Při měření charakteristiky nakrátko pomocí programu ANSYS Maxwell byl postupně nastavován budicí proud I_b od hodnoty $I_b = 20$ A až po hodnotu $I_b = 160$ A s krokem 20 A. Byla také nastavena počáteční hodnota $I_b = 1$ A.

Při simulaci měření charakteristiky nakrátko byl nasimulován trojfázový zkrat. Napětí ve fázích bylo nastaveno na hodnotu 0 V. V čase $t < 5$ ms byl synchronní generátor buzen budícím proudem $I_b = 0,001$ A. Poté byl budicí proud navyšován až do hodnoty 160 A. Při zapojení stroje do trojúhelníka musely být výsledné hodnoty proudu I_k přepočítány z fázových na hodnoty sdružené.



Obr. 49 Časový průběh proudu I_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení D 690 V

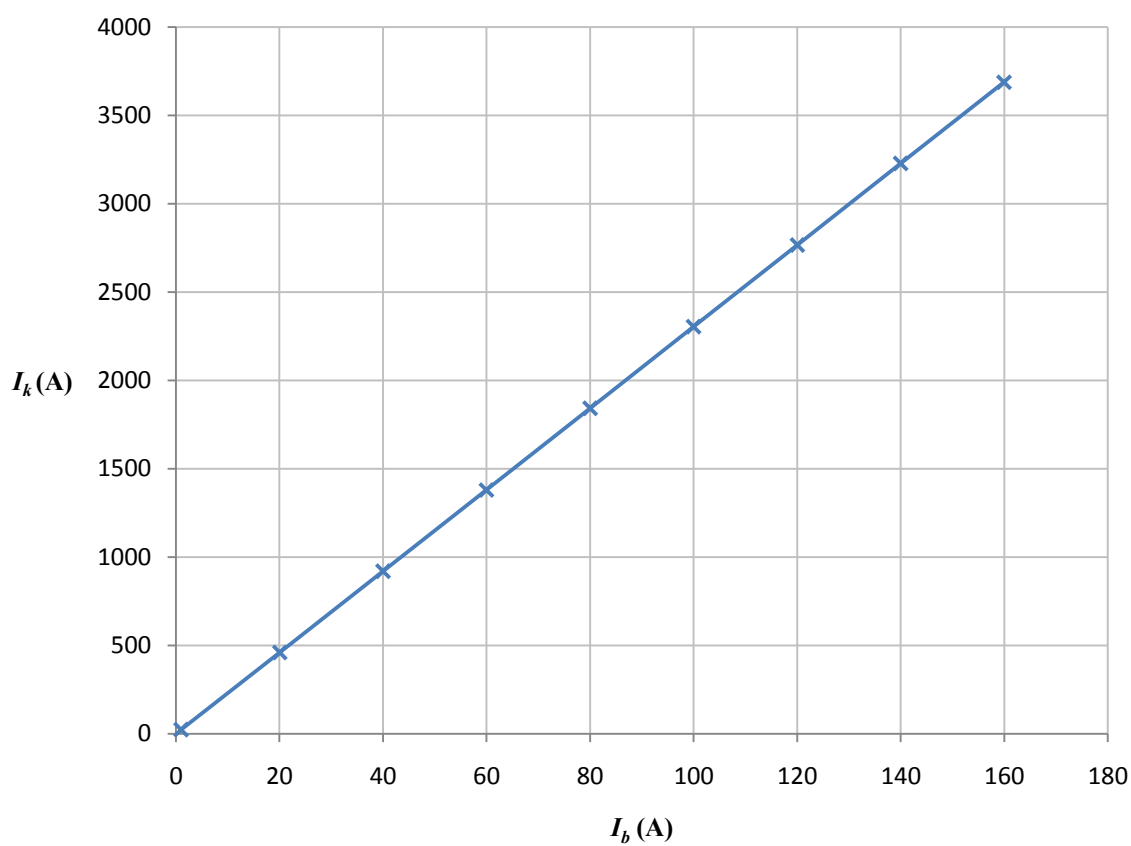


Obr. 50 Časový průběh napětí U_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení D 690 V

Stejně jako při simulaci měření charakteristiky nakrátko u varianty zapojení Y 6600 V byl nastaven zkrat v čase $t = 5$ ms. Přibližně v čase $t = 30$ ms dojde k jeho ustálení.

I_k (A)	I_b (A)
23,03	1
459,68	20
920,06	40
1380,98	60
1842,38	80
2304,32	100
2766,2	120
3228,02	140
3688,88	160

Tab. 8 Tabulka hodnot charakteristiky nakrátko - varianta D 690 V

Charakteristika nakrátko

Obr. 51 Charakteristika nakrátko - varianta zapojení D 690 V

5.2 Srovnání výsledků dosažených výpočty v programu ANSYS

Maxwell se zadanými a naměřenými hodnotami

Jak bylo již zmíněno výše, navrhovaný synchronní generátor je již vyroben a uveden do provozu, kde slouží jako speciální stroj ve zkušebně. Na stroji proběhlo před jeho samotným užíváním zkušební měření a jeho výsledky sloužily ke srovnání hodnot skutečných a hodnot vypočítaných.

Protokol o měření obsahuje výsledné hodnoty odporu vinutí statoru a rotoru při 20°C, hodnoty měření charakteristiky nakrátko a naprázdno, měření izolačního odporu vinutí, test izolace vinutí vysokým napětím, měření vibrací a další. Pro srovnání byly použity především hodnoty měření charakteristiky naprázdno a nakrátko a hodnoty odporu vinutí.

Po zadání požadovaných parametrů stroje a nastavení analýzy byl proveden analytický výpočet stroje. Poté došlo k porovnání výsledných hodnot modelu s hodnotami skutečnými. Při prvním porovnání hodnot bylo zřejmé, že prvotní nastavení modelu není příliš přesné a model musel být upraven tak, aby se co nejvíce shodoval s reálným strojem.

5.2.1 Srovnání varianty zapojení Y 6600 V

Srovnání základních údajů:

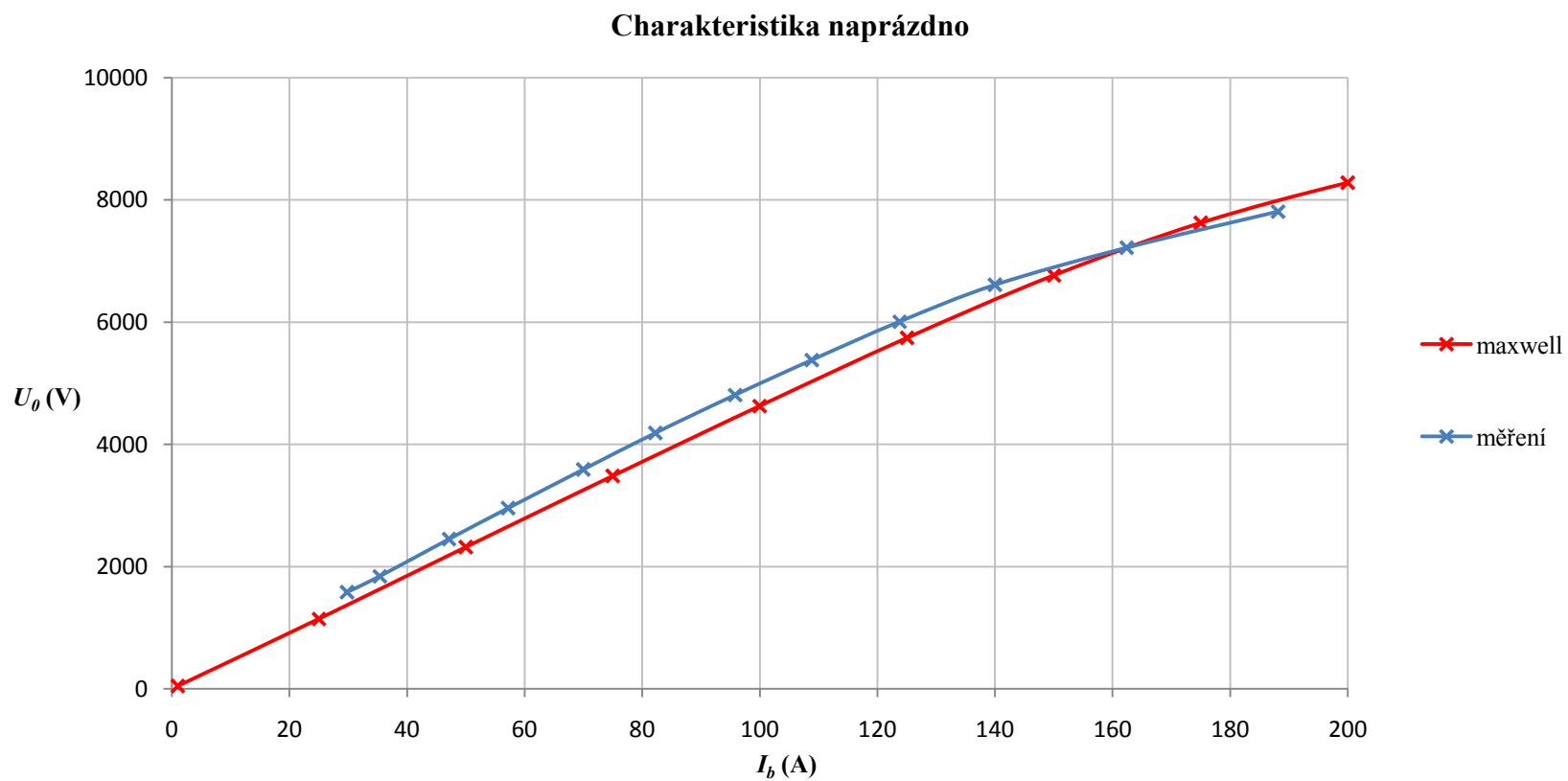
Hodnoty modelu stroje	Hodnoty stroje
$U_f = 3810,4 \text{ V}$	$U_{If} = 3810,51 \text{ V}$
$I_N = 350 \text{ A}$	$I_N = 349,92 \text{ A}$
$I_{b0} = 139,88 \text{ A}$	$I_{b0} = 140 \text{ A}$
$R_l = 0,0751 \Omega$	$R_l = 0,0739 \Omega$
$R_{rot} = 0,528 \Omega$	$R_{rot} = 0,543 \Omega$
$\cos\varphi = 0,899$	$\cos\varphi = 0,90$
$\eta = 97 \%$	$\eta = 96,27 \%$
$\Delta P_{Cu} = 70,394 \text{ kW}$	$\Delta P_{Cu} = 91,5 \text{ kW}$
$\Delta P_{Fe} = 21,28 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 21,5 \text{ kW}$
$\Delta P_{Mech} = 5 \text{ kW}$	$\Delta P_{Mech} = 4,3 \text{ kW}$
$\Delta P_{Celk} = 111,16 \text{ kW}$	$\Delta P_{Celk} = 140,4 \text{ kW}$

Tab. 9 Tabulka srovnání základních hodnot - varianta zapojení Y 6600 V

Výše uvedené hodnoty se shodují a nedochází k žádným velkým rozdílům. Model se tedy podařilo nastavit na požadovanou kvalitu.

Vyšší hodnota účinnosti modelu je způsobena nižšími ztrátami modelu. Hodnota mechanických ztrát byla odhadnuta vzhledem k výkonu a parametrům stroje. Odhad byl správný. Ztráty v železe se téměř neliší a jejich hodnoty jsou téměř shodné. Velký vliv na rozdíl celkových ztrát způsobuje rozdílná hodnota ztrát ve vinutí. Tento rozdíl může způsobit rozdíl teplot, při kterých byly ztráty měřeny. V programu ANSYS Maxwell byly ztráty určeny při teplotě 75°C a při měření byly odečteny při hodnotě 95°C. Rozdílné ztráty ve vinutí také může způsobovat použití vodičů z mědi odlišných vlastností.

Srovnání charakteristiky naprázdno:

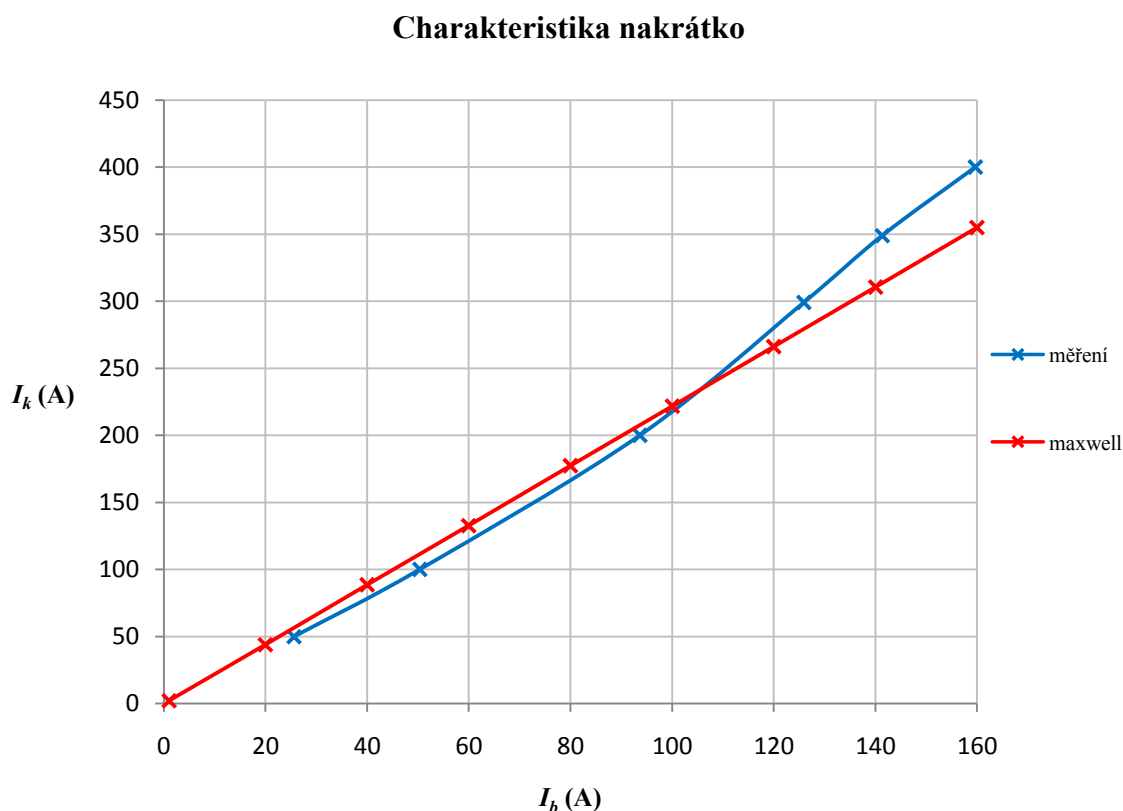


Obr. 52 Srovnání charakteristiky naprázdno - varianta zapojení Y 6600 V

V grafu jsou vyneseny průběhy charakteristiky naprázdno. Červená křivka značí charakteristiku naprázdno získanou pomocí simulace v programu ANSYS Maxwell a modrá značí hodnoty reálného měření. Pro zpracování naměřených hodnot bylo zapotřebí zjistit příslušný převod 25:1, který byl při měření použit a pomocí převodu vypočítat potřebné hodnoty pro zkonstruování charakteristiky naprázdno.

Průměrný rozdíl mezi hodnotami obou charakteristik je do 10 %. Menší rozdíl ve spodní části charakteristiky je způsoben remanencí měřeného stroje. Rozdíl v horní části charakteristiky může být způsoben mírně rozdílnými magnetizačními charakteristikami použitých materiálů.

Srovnání charakteristiky nakrátko:



Obr. 53 Srovnání charakteristiky nakrátko - varianta zapojení Y 6600 V

V grafu jsou vyneseny průběhy charakteristiky nakrátko. Červená křivka značí charakteristiku naprázdno získanou pomocí simulace v programu ANSYS Maxwell a modrá udává hodnoty reálného měření. Pro zpracování naměřených hodnot bylo zapotřebí pomocí převodu vypočítat potřebné hodnoty pro zkonstruování charakteristiky nakrátko.

Z grafu je zřejmé, že rozdíl mezi charakteristikami je minimální rozdíl a hodnoty se nijak rapidně nerozcházejí. Pouze v horní části charakteristik, v oblasti hodnoty budícího proudu $I_b = 140$ A, dochází k rozdílu proudu nakrátko $\Delta I_k = 50$ A. Tento nepříliš velký rozdíl může způsobovat rozdílná hodnota nasycení rozptylových cest. Další možností, která přichází v úvahu je také průřez aktivní mědi tlumících tyčí. Jelikož požadovaný rozměr drážky tlumícího vinutí byl v modelu automaticky vyplněn celý mědí a nebyla možnost nastavení vlastního průřezu tlumící tyče. Tento rozdíl je také způsoben i způsobem měření charakteristiky nakrátko, která byla měřena doběhem. To znamená, že stroj se elektricky pomocí jiného generátoru roztočí na frekvenci 60 Hz, poté se generátory rozpojí a vinutí zkoušeného stroje se spojí dokrátka a nabudí na požadovaný proud nakrátko.

5.2.2 Srovnání varianty zapojení D 690 V

Srovnání základních údajů:

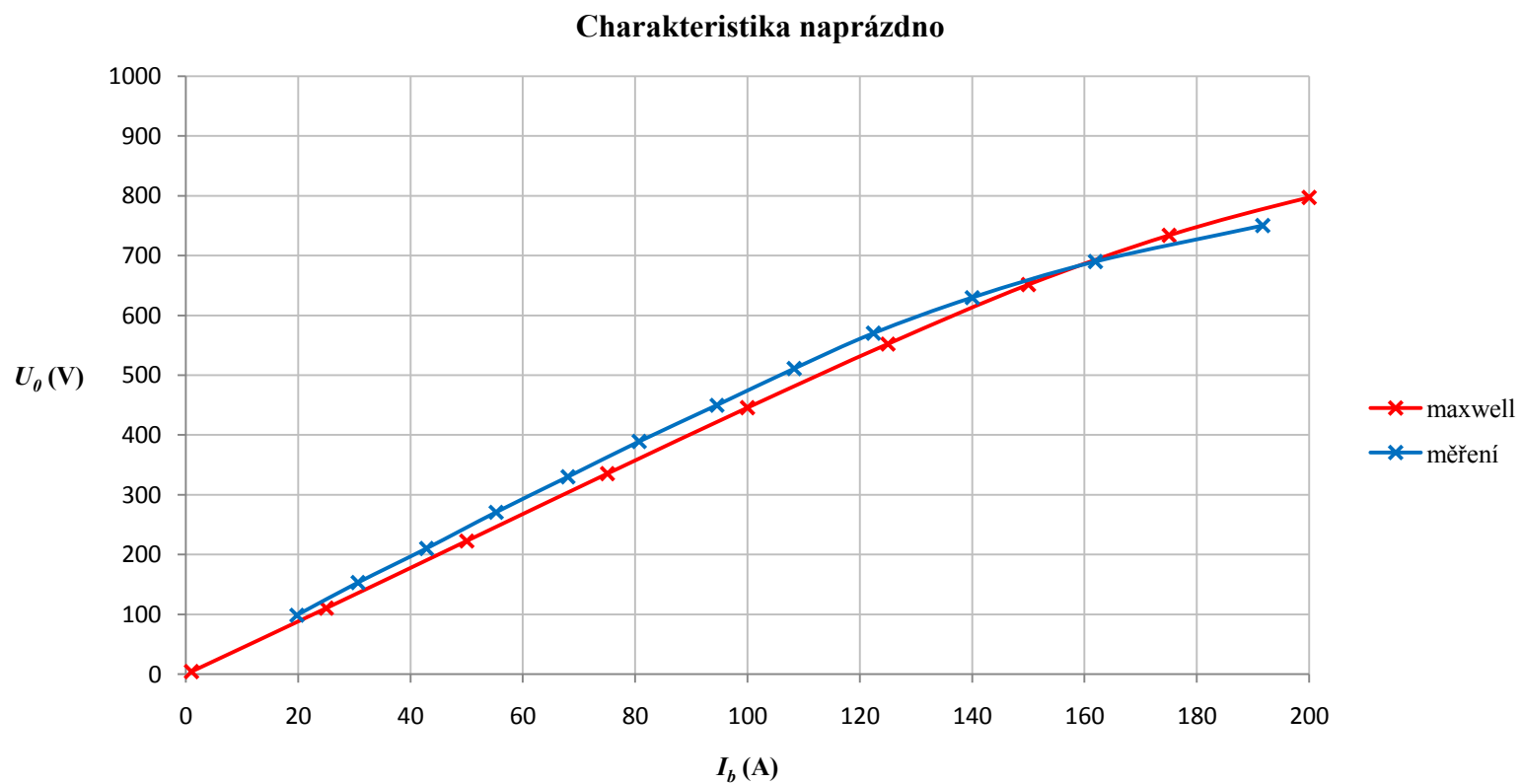
Hodnoty modelu stroje	Hodnoty stroje
$U_N = 690$ V	$U_N = 690$ V
$I_N = 3374$ A, $I_l = 1932,4$ A	$I_N = 3347$ A
$I_{b0} = 154,4$ A	$I_{b0} = 155$ A
$R_l = 0,00208$ Ω	$R_l = 0,00209$ Ω
$R_{rot} = 0,528$ Ω	$R_{rot} = 0,543$ Ω
$\cos\varphi = 0,89$	$\cos\varphi = 0,90$
$\eta = 97$ %	$\eta = 96,27$ %
$\Delta P_{Cu} = 67,41$ kW	$\Delta P_{Cu} = 86,6$ kW
$\Delta P_{Fe} = 24,65$ kW	$\Delta P_{Fe} = 31,1$ kW
$\Delta P_{Mech} = 5$ kW	$\Delta P_{Mech} = 4,8$ kW
$\Delta P_{Celk} = 110,6$ kW	$\Delta P_{Celk} = 145,6$ kW

Tab. 10 Tabulka srovnání základních hodnot - varianta zapojení D 690 V

Výše uvedené hodnoty se shodují a nedochází k žádným velkým rozdílům. Model se podařilo nastavit na požadované parametry.

Rozdílné hodnoty jsou pouze u ztrát. Ztráty v železe se liší o 6,45 kW. V porovnání s celkovými ztrátami a výkonem stroje je tato hodnota velmi malá. Ztráty v mědi se ale liší už více. Rozdíl hodnot je 19,2 kW a tento rozdíl už není příliš zanedbatelný. Jak již bylo zmíněno v porovnání varianty zapojení Y 6600 V, odlišné ztráty ve vinutí způsobuje rozdílná teplota, při které byly určovány a také použití měděných vodičů odlišných parametrů.

Srovnání charakteristiky naprázdno:

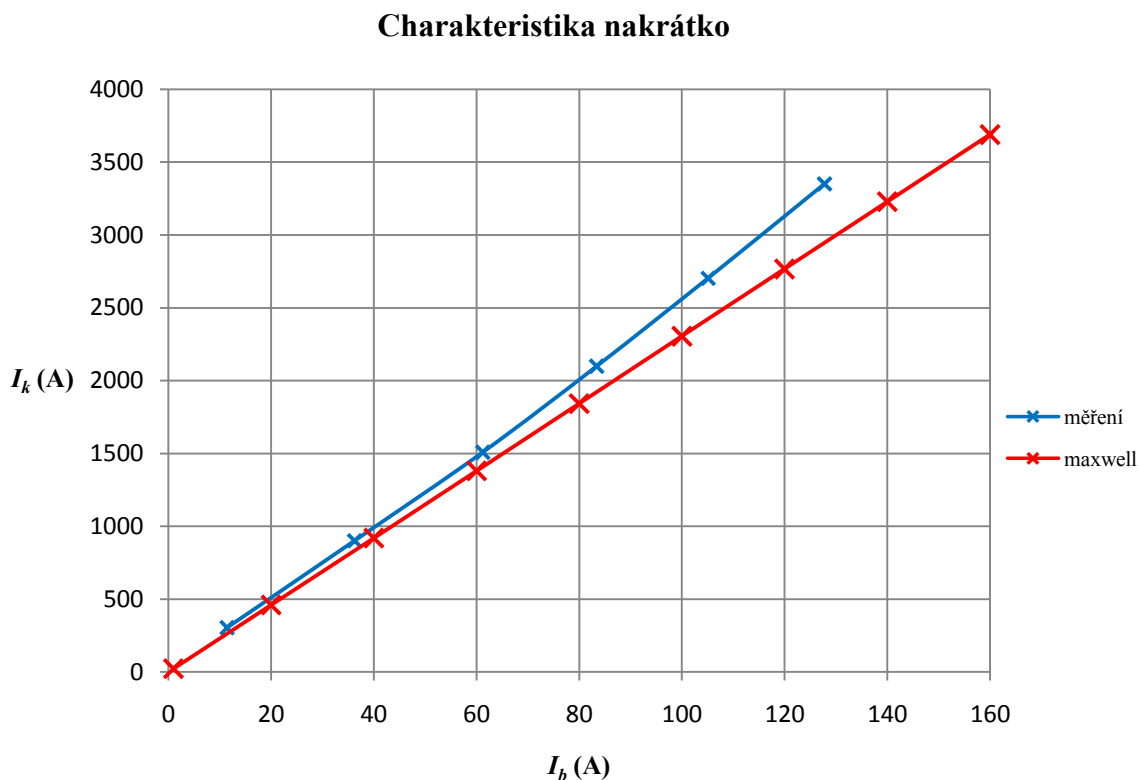


Obr. 54 Srovnání charakteristiky naprázdno - varianta zapojení D 690 V

Vynesené průběhy vyjadřují průběh charakteristik naprázdno. Červená křivka značí charakteristiku naprázdno modelu vytvořeného v programu ANSYS Maxwell a modrá je sestavena z reálného měření.

Z grafu je zřetelně vidět, že průběhy obou charakteristik naprázdno se nijak výrazně nerozcházejí. Menší rozdíl je zřejmý pouze v horní části charakteristiky. Tento rozdíl je způsoben mírně rozdílnými magnetizačními charakteristikami použitých materiálů.

Srovnání charakteristiky nakrátko:



Obr. 55 Srovnání charakteristik nakrátko - varianta zapojení D 690 V

V grafu jsou vyneseny průběhy charakteristiky nakrátko. Červená křivka značí charakteristiku naprázdno získanou pomocí simulace v programu ANSYS Maxwell a modrá značí průběh hodnot reálného měření. Pro zpracování hodnot získaných ze simulace programu ANSYS Maxwell bylo zapotřebí přepočítat fázové hodnoty proudu nakrátko na hodnoty sdružené.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce je elektromagnetický návrh dvanácti pólového speciálního synchronního generátoru o zdánlivém výkonu 4000 kVA pracujícího v podbuzeném stavu sloužícího jako pohon pro zkušebnu podle předem zadaných parametrů. Obsahem elektromagnetického návrhu generátoru je určení základních parametrů, rozměrů částí stroje, určení satorového a rotorového vinutí, dimenzování magnetického obvodu, ztráty a účinnost.

Daný synchronní generátor umožňuje vhodným propojením cívek satorového vinutí dodávat různá výstupní napětí. V diplomové práci je zpracováno zapojení do Y s jmenovitým napětím $U_N = 6600$ V a zapojení do D s jmenovitým napětím $U_N = 690$ V. Při zdánlivém výkonu $S_N = 4000$ kVA a jmenovitém napětí $U_N = 6600$ V vychází jmenovitý proud $I_N = 350$ A a při jmenovitém napětí $U_N = 690$ V vychází jmenovitý proud $I_N = 3347$ A.

Hlavním bodem diplomové práce bylo zpracování výpočtu a simulace v programu ANSYS Maxwell a porovnání dosažených výsledků se skutečnými parametry. V elektromagnetickém návrhu byly též stanoveny ztráty stroje a jeho účinnost. Nejvyšší ztráty se vyskytují ve vinutí. Účinnost synchronního generátoru vyšla $\eta = 97$ %, tato hodnota odpovídá teoretickým předpokladům. Vypočítaná hodnota účinnosti se téměř shoduje se skutečnou hodnotou, která je mírně nižší, $\eta = 96,27$ %. Vypočítaná hodnota budícího proudu naprázdno $I_{b0} = 139,9$ A při zapojení do Y s jmenovitým napětím $U_N = 6600$ V se shoduje se štítkovou hodnotou. U zapojení do D s jmenovitým napětím $U_N = 690$ V vyšel budící proud naprázdno $I_{b0} = 154,4$ A. To je způsobeno tím, že skutečná hodnota jmenovitého napětí je $U_N = 635$ V a hodnota jmenovitého napětí $U_N = 690$ V je hodnotou, která je požadována konstruktérem. Z toho vyplývá, že při napětí $U_N = 635$ V bude hodnota štítkového budícího proudu naprázdno $I_{b0} = 140$ A. Pro dosažení požadovaného napětí $U_N = 690$ V je tedy nutné stroj přibudit na hodnotu budícího proudu $I_{b0} = 154,4$ A. Ze srovnání charakteristik naprázdno vyplývá, že tyto charakteristiky se téměř shodují. Na charakteristice naprázdno získané skutečným měřením se ve spodní části křivky mírně projevuje remanence stroje. Při srovnání charakteristik naprázdno je také vidět rozdíl způsobený rozdílnými magnetizačními charakteristikami použitých materiálů. Charakteristiky nakrátko se též shodují. Malý rozdíl, který je patrný, je způsoben způsobem měření charakteristiky nakrátko, která byla měřena doběhem. To znamená, že stroj je roztočen pomocí jiného generátoru na frekvenci 60 Hz, poté se generátory rozpojí a vinutí zkoušeného stroje se spojí dokrátka a nabudí se na požadovaný proud nakrátko. Případné rozdíly a nedostatky v modelu je možné optimalizovat upravením rozměrů a parametrů použitých materiálů.

Při návrhu a samotné výrobě stroje byly použity nejmodernější a nejpropracovanější metody, bylo použito velmi kvalitních materiálů a díky tomu bylo dosaženo velmi přijatelných výsledků. Při použití toho speciálního synchronního generátoru jako pohon pro zkušebnu je zapotřebí mít stroj velmi kvalitní s odpovídajícími parametry, které tento stroj splňuje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 stran.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958, 716 stran.
- [3] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1*. 1. vydání. Praha: Academia, 1980, 388 stran.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 1. vydání. Praha: Academia, 1982, 732 stran.
- [5] Hrabovcová, Valéria, RAFAJDUS, Pavol. *Elektrické stroje. Teória a príklady. 1.* vydání. Žilina: EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2009, 415 stran.
- [6] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje (skriptum)*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 135 stran. ISBN 80-7078-857-7.
- [7] KEPPERT, Svetozar. *Elektrické stroje IV - Synchronní stroje*. 2. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1985, 167 stran.
- [8] KAČOR, Petr. *Vybrané typy elektrických strojů (skriptum)*. 1. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010, 128 stran. ISBN 978-80-248-2169-6.
- [9] KORENC, Vladimír, HOLOUBEK, Jiří. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vydání. Praha: IN-EL, 1999. 123 stran. ISBN 80-86230-07-4.
- [10] BAŠTA, Jan., KULDA, Vojtěch, MĚŘIČKA, Jiří, a kol. *Měření na elektrických strojích, I. všeobecná část*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959, 304 stran.
- [11] BENEŠ, Kryštof. *VÝVOJ synchronních STROJŮ*. PLZEŇ, 2013. Bakalářská práce. Západočeská UNICITANIVERZITA v Plzni. Vedoucí práce Ing. Michala Vachtlová
- [12] Orb Electrical Steels. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://www.cogent-power.com/>
- [13] ANSYS Maxwell. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/>
- [14] Vlastní poznámky

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Část patentního spisu Nikola Tesly.....	3
Obr. 2 První komerčně vyráběný 3 fázový generátor[11].....	3
Obr. 3 Základní princip synchronního stroje [8].....	6
Obr. 4 Synchronní stroj s hladkým rotorem [8]	7
Obr. 5 Rotor turboalternátoru.....	8
Obr. 6 Synchronní turboalternátor z roku 1930	9
Obr. 7 Synchronní stroj s vyniklými póly [8]	9
Obr. 8 Rotor hydroalternátoru.....	10
Obr. 9 Hydroalternátor	11
Obr. 10 Statorový segment [14].....	12
Obr. 11 Litá kostra s navinutým rotorovým svazkem [1]	13
Obr. 12 Svařovaná kostra [1]	13
Obr. 13 Průběh vtažení synchronního motoru do synchronismu [4]	19
Obr. 14 Momentová charakteristika synchronního motoru při asynchronním rozběhu; 1 - uzavřené budící vinutí přes odpor, 2 - zkratované budící vinutí, 3 - uzavřené budící vinutí přes odpor, rozběhové vinutí vyrobeno z materiálu s velkým odporem [4].....	20
Obr. 15 Zatěžovací charakteristiky synchronního motoru [4]	21
Obr. 16 V-křivky synchronního motoru při konstantním jmenovitém výkonu [14]	22
Obr. 17 Náhradní schéma synchronního generátoru s hladkým rotorem [14]	23
Obr. 18 Fázorový diagram synchronního generátoru s hladkým rotorem [6].....	23
Obr. 19 Indukční charakteristika [14]	24
Obr. 20 Charakteristika naprázdno synchronního generátoru.....	25
Obr. 21 Charakteristika nakrátko synchronního generátoru	26
Obr. 22 Synchronní generátor vyrobený firmou G&Em.....	27
Obr. 23 Zakótovaná statorová drážka	30
Obr. 24 Zakótovaná rotorová drážka	31
Obr. 25 Zakótovaná drážka tlumiče	32
Obr. 26 B-H charakteristika plechu M350-50A.....	33
Obr. 27 B-H charakteristika plechu M800-50A.....	34
Obr. 28 Geometrie statorového a rotorového plechu	35
Obr. 29 Geometrie rotorového plechu	35
Obr. 30 2D model navrhovaného synchronního generátoru	36
Obr. 31 Model navrhovaného synchronního generátoru.....	37
Obr. 32 3D model - detail uložení cívek	37
Obr. 33 Svorkovnice při zapojení do Y	39
Obr. 34 Zapojení statorového vinutí	40
Obr. 35 Indukční charakteristika - varianta zapojení Y 6600 V	41
Obr. 36 Závislost účinnosti η na úhlu momentu - varianta zapojení Y 6600 V	42
Obr. 37 Závislost výstupního výkonu P_N na úhlu momentu - varianta zapojení Y 6600 V	42

Obr. 38 V-křivky - varianta zapojení Y 6600 V	43
Obr. 39 Časový průběh fázového napětí U_1 - varianta zapojení Y 6600 V	44
Obr. 40 Charakteristika naprázdno - varianta zapojení Y 6600 V	46
Obr. 41 Časový průběh proudu I_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení Y 6600 V	47
Obr. 42 Časový průběh napětí U_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení Y 6600 V	48
Obr. 43 Charakteristika nakrátko - varianta zapojení Y 6600 V	49
Obr. 44 Svorkovnice při zapojení do D	50
Obr. 45 Indukční charakteristika - varianta zapojení D 690 V	51
Obr. 46 V-křivky - varianta zapojení D 690 V	52
Obr. 47 Časový průběh napětí U_1 - varianta zapojení D 690 V	53
Obr. 48 Charakteristika naprázdno - varianta zapojení D 690 V	55
Obr. 49 Časový průběh proudu I_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení D 690 V	56
Obr. 50 Časový průběh napětí U_1 při trojfázovém zkratu - varianta zapojení D 690 V	57
Obr. 51 Charakteristika nakrátko - varianta zapojení D 690 V	58
Obr. 52 Srovnání charakteristiky naprázdno - varianta zapojení Y 6600 V	61
Obr. 53 Srovnání charakteristiky nakrátko - varianta zapojení Y 6600 V	62
Obr. 54 Srovnání charakteristiky naprázdno - varianta zapojení D 690 V	65
Obr. 55 Srovnání charakteristik nakrátko - varianta zapojení D 690 V	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Tabulka štítkových hodnot.....	28
Tab. 2 Tabulka parametrů statorových a rotorových svazků	28
Tab. 3 Tabulka parametrů statorového a rotorového vinutí	29
Tab. 4 Tabulka parametrů tlumícího vinutí.....	29
Tab. 5 Tabulka hodnot charakteristiky naprázdno - varianta zapojení Y 6600 V.....	45
Tab. 6 Tabulka hodnot charakteristiky nakrátko - varianta zapojení Y 6600 V	49
Tab. 7 Tabulka hodnot charakteristiky naprázdno - varianta zapojení Y - 690 V	54
Tab. 8 Tabulka hodnot charakteristiky nakrátko - varianta D 690 V	57
Tab. 9 Tabulka srovnání základních hodnot - varianta zapojení Y 6600 V	59
Tab. 10 Tabulka srovnání základních hodnot - varianta zapojení D 690 V	63

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Vypočtená data pro variantu zapojení Y 6600 V a D 690 V pomocí softwaru Maxwell
- P II Parametry elektrotechnického plechu M350-50A
- P III Parametry elektrotechnického plechu M800-50A

PŘÍLOHA P I: VYPOČTENÁ DATA PRO VARIANTU ZAPOJENÍ **Y 6600 V A D 690 V POMOCÍ SOFTWARE MAXWELL**

ZAPOJENÍ Y 6600 V		ZAPOJENÍ Y 6600 V	
GENERAL DATA		GENERAL DATA	
Rated Apparent Power (kVA):	4000	Rated Apparent Power (kVA):	4000
Rated Power Factor:	0.9	Rated Power Factor:	0.9
Rated Voltage (V):	6600	Rated Voltage (V):	690
Winding Connection:	Wye	Winding Connection:	Delta
Load Type:	Infinite Bus	Load Type:	Infinite Bus
Number of Poles:	12	Number of Poles:	12
Frequency (Hz):	50	Frequency (Hz):	50
Rated Speed (rpm):	500	Rated Speed (rpm):	500
Operating Temperature (C):	75	Operating Temperature (C):	75
Frictional Loss (W):	5000	Frictional Loss (W):	5000
Windage Loss (W):	0	Windage Loss (W):	0
Exciter Efficiency (%):	90	Exciter Efficiency (%):	90
Exciting Current (A):	0	Exciting Current (A):	0
STATOR DATA		STATOR DATA	
Number of Stator Slots:	144	Number of Stator Slots:	144
Outer Diameter of Stator (mm):	1440	Outer Diameter of Stator (mm):	1440
Inner Diameter of Stator (mm):	1160	Inner Diameter of Stator (mm):	1160
Type of Stator Slot:	6	Type of Stator Slot:	6
Stator Slot		Stator Slot	
hs0 (mm):	0.7	hs0 (mm):	0.7
hs1 (mm):	3.3	hs1 (mm):	3.3
hs2 (mm):	68.5	hs2 (mm):	68.5
bs1 (mm):	16.9	bs1 (mm):	16.9
bs2 (mm):	12.3	bs2 (mm):	12.3

Top Tooth Width (mm): 13.0068	Top Tooth Width (mm): 13.0068
Bottom Tooth Width (mm): 16.1699	Bottom Tooth Width (mm): 16.1699
Number of Sectors per Lamination: 14	Number of Sectors per Lamination: 14
Skew Width (slots): 1	Skew Width (slots): 1
Length of Stator Core (mm): 1250	Length of Stator Core (mm): 1250
Stacking Factor of Stator Core: 0.95	Stacking Factor of Stator Core: 0.95
Type of Steel: M350-50A	Type of Steel: M350-50A
Press board thickness (mm): 3	Press board thickness (mm): 3
Magnetic press board Yes	Magnetic press board Yes
STATOR WINDING DATA	STATOR WINDING DATA
End Length Adjustment (mm): 105.296	End Length Adjustment (mm): 107.324
End-Coil Clearance (mm): 0	End-Coil Clearance (mm): 0
Number of Parallel Branches: 2	Number of Parallel Branches: 12
Number of Layers: 2	Number of Layers: 2
Winding Type: Whole Coiled	Winding Type: Whole Coiled
Coil Pitch: 10	Coil Pitch: 10
Coil Half-Turn Length (mm): 1831	Coil Half-Turn Length (mm): 1831
Number of Conductors per Slot: 8	Number of Conductors per Slot: 8
Number of Wires per Conductor: 1	Number of Wires per Conductor: 1
Limited Wires per Coil Side: 4	Limited Wires per Coil Side: 4
in width direction 1	in width direction 1
in thickness direction 4	in thickness direction 4
Wire Width (mm): 9.27	Wire Width (mm): 9.27
Wire Thickness (mm): 6.54	Wire Thickness (mm): 6.54
Wire Wrap Thickness (mm): 0.7	Wire Wrap Thickness (mm): 0.7
Wire Direction in Slot: Horizontal	Wire Direction in Slot: Horizontal
Coil Wrap (mm): 1	Coil Wrap (mm): 1
Coil Width (mm): 12.27	Coil Width (mm): 11.97
Coil Height (mm): 32.16	Coil Height (mm): 30.96
Bottom Insulation (mm): 0	Bottom Insulation (mm): 0
Wedge Thickness (mm): 0.1	Wedge Thickness (mm): 0.1

Slot Liner Thickness (mm): 0	Slot Liner Thickness (mm): 0
Layer Insulation (mm): 0	Layer Insulation (mm): 0
Slot Area (mm^2): 899.34	Slot Area (mm^2): 899.34
Slot Fill Factor (%): 86.9214	Slot Fill Factor (%): 86.9214
Stator Winding Factor: 0.925031	Stator Winding Factor: 0.925031
ROTOR DATA	ROTOR DATA
Air Gap (mm): 10	Air Gap (mm): 10
Outer Diameter (mm): 1140	Outer Diameter (mm): 1140
Inner Diameter (mm): 710	Inner Diameter (mm): 710
Length of Rotor (mm): 1250	Length of Rotor (mm): 1250
Stacking Factor of Iron Core: 0.95	Stacking Factor of Iron Core: 0.95
Type of Steel: M800-50A	Type of Steel: M800-50A
Press board thickness (mm): 3	Press board thickness (mm): 0
Magnetic press board No	Magnetic press board No
Number of Indexing Slots: 108	Number of Indexing Slots: 108
Number of Real Slots: 72	Number of Real Slots: 72
Type of Rotor Slot: 3	Type of Rotor Slot: 3
Rotor Slot	Rotor Slot
hs0 (mm): 3	hs0 (mm): 3
hs1 (mm): 7	hs1 (mm): 7
hs2 (mm): 100	hs2 (mm): 100
bs0 (mm): 6	bs0 (mm): 6
bs1 (mm): 20	bs1 (mm): 20
bs2 (mm): 14.18	bs2 (mm): 14.18
rs (mm): 0	rs (mm): 0
Rotor Top Tooth Width (mm): 12.5829	Rotor Top Tooth Width (mm): 12.5829
Rotor Bottom Tooth Width (mm): 12.5835	Rotor Bottom Tooth Width (mm): 12.5835
Magnetic Shaft: Yes	Magnetic Shaft: Yes
FIELD WINDING DATA	FIELD WINDING DATA
End Length Adjustment (mm): 0	End Length Adjustment (mm): 0

End-Coil Clearance (mm):	0	End-Coil Clearance (mm):	0
Number of Parallel Branches:	1	Number of Parallel Branches:	1
Min Coil Pitch:	4	Min Coil Pitch:	4
Coil Half-Turn Length (mm):	1570	Coil Half-Turn Length (mm):	1570
Number of Conductors per Slot:	16	Number of Conductors per Slot:	16
Number of Wires per Conductor:	24	Number of Wires per Conductor:	24
Wire Diameter (mm):	1.8	Wire Diameter (mm):	1.8
Wire Wrap Thickness (mm):	0.11	Wire Wrap Thickness (mm):	0.11
Wedge Thickness (mm):	5	Wedge Thickness (mm):	5
Slot Liner Thickness (mm):	0.56	Slot Liner Thickness (mm):	0.56
Layer Insulation (mm):	0	Layer Insulation (mm):	0
Slot Area (mm ²):	1818	Slot Area (mm ²):	1818
Net Slot Area (mm ²):	1603.92	Net Slot Area (mm ²):	1603.92
Slot Fill Factor (%):	87.34	Slot Fill Factor (%):	87.3402
Limited Slot Fill Factor (%):	90	Limited Slot Fill Factor (%):	90
Field Winding Factor:	0.828983	Field Winding Factor:	0.828983
DAMPER DATA		DAMPER DATA	
Type of Damper Slot:	1	Type of Damper Slot:	1
Damper Slot		Damper Slot	
hs0 (mm):	1	hs0 (mm):	1
hs2 (mm):	0	hs2 (mm):	0
bs0 (mm):	1	bs0 (mm):	1
bs1 (mm):	7.5	bs1 (mm):	7.5
bs2 (mm):	7.5	bs2 (mm):	7.5
End Length of Damper Bar (mm):	8	End Length of Damper Bar (mm):	8
End Ring Width (mm):	5	End Ring Width (mm):	5
End Ring Height (mm):	10	End Ring Height (mm):	10
Resistivity of Damper Bar		Resistivity of Damper Bar	
at 75 Centigrade (ohm.mm ² /m): 0.0172414		at 75 Centigrade (ohm.mm ² /m): 0.0172414	
Resistivity of Damper Ring		Resistivity of Damper Ring	
at 75 Centigrade (ohm.mm ² /m): 0.0172414		at 75 Centigrade (ohm.mm ² /m): 0.0172414	

<p>SOME FACTORS AND MATERIAL CONSUMPTION</p> <p>Short-Circuit Ratio: 0.958808</p> <p>Electrical Pole Embrace: 0.665947</p> <p>Air-Gap Flux Total Harmonic</p> <p>Distortion at No-Load (%): 7.04876</p> <p>Phase-Voltage Total Harmonic</p> <p>Distortion at No-Load (%): 0.307311</p> <p>Line-Voltage Total Harmonic</p> <p>Distortion at No-Load (%): 0.304563</p> <p>Copper Wire Density (kg/m³): 8900</p> <p>Damper Bar Material Density (kg/m³): 8933</p> <p>Damper Ring Material Density (kg/m³): 8933</p> <p>Armature Core Steel Density (kg/m³): 7650</p> <p>Rotor Core Steel Density (kg/m³): 7800</p> <p>Armature Copper Weight (kg): 1122.01</p> <p>Field Copper Weight (kg): 983.079</p> <p>Damper Bar Material Weight (kg): 55.4149</p> <p>Damper Ring Material Weight (kg): 3.1656</p> <p>Armature Core Steel Weight (kg): 4038</p> <p>Rotor Core Steel Weight (kg): 4529.47</p> <p>Stator Net Weight (kg): 5160.01</p> <p>Rotor Net Weight (kg): 5571.13</p> <p>Armature Core Steel Consumption (kg): 5968.73</p> <p>Rotor Core Steel Consumption (kg): 12101</p> <p>UNSATURATED STEADY STATE PARAMETERS</p> <p>Armature Resistance R1 (ohm): 0.075173</p> <p>Armature Resistance at 20C (ohm):</p>	<p>SOME FACTORS AND MATERIAL CONSUMPTION</p> <p>Short-Circuit Ratio: 1.14948</p> <p>Electrical Pole Embrace: 0.665947</p> <p>Air-Gap Flux Total Harmonic</p> <p>Distortion at No-Load (%): 7.04876</p> <p>Phase-Voltage Total Harmonic</p> <p>Distortion at No-Load (%): 0.307311</p> <p>Line-Voltage Total Harmonic</p> <p>Distortion at No-Load (%): 0.304563</p> <p>Copper Wire Density (kg/m³): 8900</p> <p>Damper Bar Material Density (kg/m³): 8933</p> <p>Damper Ring Material Density (kg/m³): 8933</p> <p>Armature Core Steel Density (kg/m³): 7650</p> <p>Rotor Core Steel Density (kg/m³): 7800</p> <p>Armature Copper Weight (kg): 1122.01</p> <p>Field Copper Weight (kg): 983.079</p> <p>Damper Bar Material Weight (kg): 55.1535</p> <p>Damper Ring Material Weight (kg): 3.1656</p> <p>Armature Core Steel Weight (kg): 4038</p> <p>Rotor Core Steel Weight (kg): 4529.47</p> <p>Stator Net Weight (kg): 5160.01</p> <p>Rotor Net Weight (kg): 5570.87</p> <p>Armature Core Steel Consumption (kg): 5968.73</p> <p>Rotor Core Steel Consumption (kg): 12101</p> <p>UNSATURATED STEADY STATE PARAMETERS</p> <p>Armature Resistance R1 (ohm): 0.00208814</p> <p>Armature Resistance at 20C (ohm): 0.00171766</p> <p>Armature Leakage Reactance X1 (ohm):</p>
--	--

0.0618358	0.0172539
Armature Leakage Reactance X_l (ohm): 0.617357	D-Axis Reactive Reactance X_{ad} (ohm): 0.302527
D-Axis Reactive Reactance X_{ad} (ohm): 10.891	Q-Axis Reactive Reactance X_{aq} (ohm): 0.30174
Q-Axis Reactive Reactance X_{aq} (ohm): 10.8626	D-Axis Reactance $X_l + X_{ad}$ (ohm): 0.319781
D-Axis Reactance $X_l + X_{ad}$ (ohm): 11.5083	Q-Axis Reactance $X_l + X_{aq}$ (ohm): 0.318994
Q-Axis Reactance $X_l + X_{aq}$ (ohm): 11.48	Field Winding Resistance R_f (ohm): 0.642637
Field Winding Resistance R_f (ohm): 0.642637	Field Winding Resistance at 20C (ohm): 0.528621
Field Winding Resistance at 20C (ohm): 0.528621	Armature Resistance per Unit: 0.0058479
Armature Resistance per Unit: 0.00690333	Armature Leakage Reactance per Unit: 0.0483202
Armature Leakage Reactance per Unit: 0.0566935	D-Axis Reactive Reactance per Unit: 0.847238
D-Axis Reactive Reactance per Unit: 1.00015	Q-Axis Reactive Reactance per Unit: 0.845032
Q-Axis Reactive Reactance per Unit: 0.997543	D-Axis Reactance per Unit: 0.895558
D-Axis Reactance per Unit: 1.05684	Q-Axis Reactance per Unit: 0.895558
Q-Axis Reactance per Unit: 1.05684	Field Winding Resistance per Unit: 0.00259064
Field Winding Resistance per Unit: 0.0030582	Base Voltage (V): 690
Base Voltage (V): 3810.4	Base Current (A): 1932.37
Base Current (A): 349.919	Base Impedance (ohm): 0.357075
Base Impedance (ohm): 10.8894	
NO-LOAD MAGNETIC DATA	NO-LOAD MAGNETIC DATA
Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.44241	Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.56527
Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 1.18768	Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 1.29041
Rotor-Top-Teeth Flux Density (Tesla): 0.873891	Rotor-Top-Teeth Flux Density (Tesla): 0.949486
Rotot-Teeth Flux Density (Tesla): 0.866392	Rotot-Teeth Flux Density (Tesla): 0.941337
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 0.175183	Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 0.190337
Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.751794	Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.816823
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 56.9609	Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 173.308
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 16.1868	Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 23.0344

Rotor-Top-Teeth Ampere Turns (A.T): 1.61156	Rotor-Top-Teeth Ampere Turns (A.T): 1.70535
Rotot-Teeth Ampere Turns (A.T): 19.204	Rotot-Teeth Ampere Turns (A.T): 20.3104
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 3.05388	Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 3.15655
Air-Gap Ampere Turns (A.T): 6617.59	Air-Gap Ampere Turns (A.T): 7190
Total Ampere Turn Drop (A.T): 6714.6	Total Ampere Turn Drop (A.T): 7411.52
Saturation Factor: 1.01466	Saturation Factor: 1.03081
D-Axis Armature Reaction (A.T): 0	D-Axis Armature Reaction (A.T): 0
Q-Axis Armature Reaction (A.T): 0	Q-Axis Armature Reaction (A.T): 0
Exciting Ampere Turns (A.T): 6714.6	Exciting Ampere Turns (A.T): 7411.52
Exciting Current (A): 139.888	Exciting Current (A): 154.407
Correction Factor for Magnetic	Correction Factor for Magnetic
Circuit Length of Stator Yoke: 0.5	Circuit Length of Stator Yoke: 0.5
Correction Factor for Magnetic	Correction Factor for Magnetic
Circuit Length of Roor Yoke: 0.5	Circuit Length of Roor Yoke: 0.5
Cogging Torque (N.m): 6.96234e-009	Cogging Torque (N.m): 1.64378e-008
FULL-LOAD MAGNETIC DATA	FULL-LOAD MAGNETIC DATA
Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.48833	Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.60688
Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 1.22581	Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 1.32551
Rotor-Top-Teeth Flux Density (Tesla): 0.901944	Rotor-Top-Teeth Flux Density (Tesla): 0.975315
Rotot-Teeth Flux Density (Tesla): 0.894204	Rotot-Teeth Flux Density (Tesla): 0.966944
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 0.180807	Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 0.195514
Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.775926	Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.839042
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 80.892	Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 234.995
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 18.4497	Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 28.6876
Rotor-Top-Teeth Ampere Turns (A.T): 1.64497	Rotor-Top-Teeth Ampere Turns (A.T): 1.73815
Rotot-Teeth Ampere Turns (A.T): 19.599	Rotot-Teeth Ampere Turns (A.T): 20.7001
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 3.09198	Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 3.19163
Air-Gap Ampere Turns (A.T): 6830.01	Air-Gap Ampere Turns (A.T): 7385.58
Total Ampere Turn Drop (A.T): 6953.69	Total Ampere Turn Drop (A.T): 7674.89
Saturation Factor: 1.01811	Saturation Factor: 1.03917

D-Axis Armature Reaction (A.T): 5638.78	D-Axis Armature Reaction (A.T): 4998.89
Q-Axis Armature Reaction (A.T): 3456.45	Q-Axis Armature Reaction (A.T): 3472.2
Exciting Ampere Turns (A.T): 11672.6	Exciting Ampere Turns (A.T): 11843.4
Exciting Current (A): 243.179	Exciting Current (A): 246.738
Exciting Current at Rated	Exciting Current at Rated
Short-Circuit Current (A): 145.897	Short-Circuit Current (A): 134.327
Exciting Current with PF=0 (A): 286.965	Exciting Current with PF=0 (A): 291.608
FULL-LOAD ELECTRIC DATA	FULL-LOAD ELECTRIC DATA
Power Factor Angle (degree): 25.9123	Power Factor Angle (degree): 25.9277
Power Angle (degree): 32.5137	Power Angle (degree): 29.2186
Induced Voltage per Unit: 1.73103	Induced Voltage per Unit: 1.58394
Phase Voltage (V): 3810.4	Phase Voltage (V): 690
Phase Current (A): 349.919	Phase Current (A): 1932.37
Armature Thermal Load (A ² /mm ³): 161.903	Armature Thermal Load (A ² /mm ³): 137.15
Specific Electric Loading (A/mm): 55.3073	Specific Electric Loading (A/mm): 50.9041
Armature Current Density (A/mm ²): 2.92734	Armature Current Density (A/mm ²): 2.69429
Exciting Current Density (A/mm ²): 3.9818	Exciting Current Density (A/mm ²): 4.04008
Copper Loss (W): 70379.2	Copper Loss (W): 67410.5
Armature Copper Loss (W): 23442.9	Armature Copper Loss (W): 19858.8
Armature Excess Copper Loss (W): 4170.38	Armature Excess Copper Loss (W): 3532.78
Field Copper Loss (W): 38489.3	Field Copper Loss (W): 39617
Exciter Loss (W): 4276.59	Exciter Loss (W): 4401.89
Iron-Core Loss (W): 21272.2	Iron-Core Loss (W): 24650.7
Stator-Teeth Core Loss (W): 9464.29	Stator-Teeth Core Loss (W): 10951.2
Stator-Yoke Core Loss (W): 11383.6	Stator-Yoke Core Loss (W): 13203.3
Stator Surface Excess Loss (W): 8.60075	Stator Surface Excess Loss (W): 10.0569
Rotor Surface Excess Loss (W): 415.718	Rotor Surface Excess Loss (W): 486.1
Load Excess Core Loss (W): 14486	Load Excess Core Loss (W): 13572.5
Stator Surface by Spread Harmonics (W): 23.525	Stator Surface by Spread Harmonics (W): 24.2187
Stator Surface by Teeth Harmonics (W): 3144.02	Stator Surface by Teeth Harmonics (W): 3236.74
Stator Pulsation by Teeth Harmonics (W): 3967.12	Stator Pulsation by Teeth Harmonics (W): 4084.11

Rotor Surface by Spread Harmonics (W): 28.8677	Rotor Surface by Spread Harmonics (W): 24.4542
Rotor Surface by Teeth Harmonics (W): 119.373	Rotor Surface by Teeth Harmonics (W): 101.122
Magnetic Accessories by Load Current (W): 7203.09	Magnetic Accessories by Load Current (W): 6101.83
Mechanical Loss (W): 5000	Mechanical Loss (W): 5000
Friction Loss (W): 5000	Friction Loss (W): 5000
Windage Loss (W): 0	Windage Loss (W): 0
Total Loss (kW): 111.137	Total Loss (kW): 110.634
Input Power (kW): 3708.99	Input Power (kW): 3708.02
Output Power (kW): 3597.86	Output Power (kW): 3597.38
Efficiency (%): 97.0036	Efficiency (%): 97.0164
Shaft Torque (N.m): 70836.5	Shaft Torque (N.m): 70817.9
Apparent Power (kVA): 4000	Apparent Power (kVA): 4000
Power Factor: 0.899464	Power Factor: 0.899346
TRANSIENT PARAMETERS & TIME CONSTANTS	TRANSIENT PARAMETERS & TIME CONSTANTS
Note: All parameters are referred to the armature side.	Note: All parameters are referred to the armature side.
Field Winding Resistance (ohm): 0.0333019	Field Winding Resistance (ohm): 0.000925053
Field Leakage Reactance (ohm): 1.50914	Field Leakage Reactance (ohm): 0.0410372
Damper Resistance (ohm): 0.587936	Damper Resistance (ohm): 0.0163316
Damper Leakage Reactance (ohm): 0.894617	Damper Leakage Reactance (ohm): 0.0248505
D-axis Transient Reactance (ohm): 1.94283	D-axis Transient Reactance (ohm): 0.0533894
D-axis Subtransient Reactance (ohm): 1.15148	D-axis Subtransient Reactance (ohm): 0.0319784
Q-axis Subtransient Reactance (ohm): 1.4439	Q-axis Subtransient Reactance (ohm): 0.0402135
Negative-Sequence Reactance (ohm): 1.28121	Negative-Sequence Reactance (ohm): 0.0356262
Zero-Sequence Reactance (ohm): 0.617357	Zero-Sequence Reactance (ohm): 0.0172539
Field Winding Resistance per Unit: 0.0030582	Field Winding Resistance per Unit: 0.00259064
Field Leakage Reactance per Unit: 0.138588	Field Leakage Reactance per Unit: 0.114926
Damper Resistance per Unit: 0.0539917	
Damper Leakage Reactance per Unit:	

0.082155	Damper Resistance per Unit: 0.0457371
D-axis Transient Reactance per Unit: 0.178415	Damper Leakage Reactance per Unit: 0.0695945
D-axis Subtransient Reactance per Unit: 0.105743	D-axis Transient Reactance per Unit: 0.149519
Q-axis Subtransient Reactance per Unit: 0.132597	D-axis Subtransient Reactance per Unit: 0.0895564
Negative-Sequence Reactance per Unit: 0.117657	Q-axis Subtransient Reactance per Unit: 0.112619
Zero-Sequence Reactance per Unit: 0.0566935	Negative-Sequence Reactance per Unit: 0.0997724
Field Winding Time Constant with Open-Circuit Armature (s): 1.18524	Zero-Sequence Reactance per Unit: 0.0483202
D-axis Transient Time Constant (s): 0.200092	Field Winding Time Constant with Open-Circuit Armature (s): 1.1822
D-axis Subtransient Time Constant with Open-Circuit Armature (s): 0.00623411	D-axis Transient Time Constant (s): 0.197376
D-axis Subtransient Time Constant (s): 0.00369483	D-axis Subtransient Time Constant with Open-Circuit Armature (s): 0.00623273
Q-axis Subtransient Time Constant (s): 0.00675678	D-axis Subtransient Time Constant (s): 0.00373319
Armature Time Constant (s): 0.0542513	Q-axis Subtransient Time Constant (s): 0.00676348
TRANSIENT FEA INPUT DATA	Armature Time Constant (s): 0.0543076
For Armature Winding:	TRANSIENT FEA INPUT DATA
Number of Turns: 192	For Armature Winding:
Parallel Branches: 2	Number of Turns: 192
Terminal Resistance (ohm): 0.075173	Parallel Branches: 12
End Leakage Inductance (H): 0.000660329	Terminal Resistance (ohm): 0.00208814
For Field Winding:	End Leakage Inductance (H): 1.86771e-005
Number of Turns: 576	For Field Winding:
Parallel Branches: 1	Number of Turns: 576
Terminal Resistance (ohm): 0.642637	Parallel Branches: 1
End Leakage Inductance (H): 0.00623878	

For Damper End Ring Between Two Bars of One Side:	Terminal Resistance (ohm): 0.642637
End Ring Resistance (ohm): 1.12224e-005	End Leakage Inductance (H): 0.00629598
End Ring Inductance (H): 2.25843e-008	For Damper End Ring Between Two Bars of One Side:
2D Equivalent Value:	End Ring Resistance (ohm): 1.12224e-005
Equivalent Model Depth (mm): 1270	End Ring Inductance (H): 2.25843e-008
Equivalent Stator Stacking Factor: 0.939764	2D Equivalent Value:
Equivalent Rotor Stacking Factor: 0.935039	Equivalent Model Depth (mm): 1270
Estimated Rotor Inertia (kg m ²): 1616.68	Equivalent Stator Stacking Factor: 0.939764
	Equivalent Rotor Stacking Factor: 0.935039
	Estimated Rotor Inertia (kg m ²): 1616.68

P I Vypočtená data pro variantu zapojení Y 6600 V a D 690

PŘÍLOHA P II: PARAMETRY ELEKTROTECHNICKÉHO PLECHU M350-50A

Typical data for SURA® M350-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0,06	0,17	0,48	2,02	8,34
0,2	0,09	0,20	48,1	0,24	0,62	1,75	7,15	29,0
0,3	0,18	0,36	56,1	0,50	1,30	3,62	14,7	60,1
0,4	0,30	0,54	63,2	0,81	2,15	6,02	24,6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1,18	3,17	8,96	37,2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1,60	4,36	12,5	53,1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2,08	5,73	16,6	72,7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2,62	7,31	21,5	96,9	474
0,9	1,16	1,94	106	3,21	9,09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3,88	11,1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4,61	13,4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5,43	16,0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6,37	18,9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7,53	22,3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8,99	26,6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,29
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,39
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz	
H – 2500 A/m, T	1,58
H – 5000 A/m, T	1,67
H – 10000 A/m, T	1,78

Coercivity (DC), A/m	45
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm ²	320
Tensile strength, N/mm ²	460
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	160

RD represents the rolling direction
TD represents the transverse direction
Values for yield strength (0.2 % proof strength)
and tensile strength are given for the rolling direction
Values for the transverse direction are approximately 5% higher



PŘÍLOHA P III: PARAMETRY ELEKTROTECHNICKÉHO PLECHU M800-50A

Typical data for SURA® M800-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz
0,1	0,05	0,17	84,5
0,2	0,18	0,44	107
0,3	0,43	0,76	121
0,4	0,70	1,12	133
0,5	1,01	1,52	145
0,6	1,35	1,97	156
0,7	1,72	2,46	168
0,8	2,13	3,00	180
0,9	2,56	3,60	194
1,0	3,05	4,27	209
1,1	3,59	5,04	228
1,2	4,20	5,96	254
1,3	4,91	6,95	304
1,4	5,70	8,49	402
1,5	6,60	11,9	660
1,6	7,54	25,2	1480
1,7	8,30	67,4	3710
1,8	8,83	151	7300

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	6,60
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	3,05
Anisotropy of loss, %	5
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,65
H = 5000 A/m, T	1,74
H = 10000 A/m, T	1,85
Coercivity (DC), A/m	100
Relative permeability at 1.5 T	1810
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	23
Yield strength, N/mm ²	300
Tensile strength, N/mm ²	415
Young's modulus, RD, N/mm ²	210 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	220 000
Hardness HV5 (VHN)	130

RD represents the rolling direction
TD represents the transverse direction
Values for yield strength (0.2 % proof strength)
and tensile strength are given for the rolling direction
Values for the transverse direction are approximately 5% higher

